



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO ELECTROMECAÁNICO**

**TEMA: DIMENSIONADO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO
DIDÁCTICO DE BOMBEO SOLAR FOTOVOLTAICO PARA EL
ANÁLISIS CUANTITATIVO DEL IMPULSO DE FLUIDO EN LA
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
ESPE EXTENSIÓN LATACUNGA**

AUTOR: VALENCIA VITERI, GUILLERMO SEBASTIÁN

DIRECTOR: ING. JIMÉNEZ LEÓN, MARIO POLIBIO

LATACUNGA

2019



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo titulado “***DIMENSIONADO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DIDÁCTICO DE BOMBEO SOLAR FOTOVOLTAICO PARA EL ANÁLISIS CUANTITATIVO DEL IMPULSO DE FLUIDO EN LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE EXTENSIÓN LATACUNGA***” fue realizado por el señor ***Valencia Viteri, Guillermo Sebastián*** el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Latacunga, 24 de enero del 2019

Ing. Jiménez León Mario Polibio

C. C.: 0501519326



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTROMECAÁNICA**

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Valencia Viteri, Guillermo Sebastián**, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: ***DIMENSIONADO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DIDÁCTICO DE BOMBEO SOLAR FOTOVOLTAICO PARA EL ANÁLISIS CUANTITATIVO DEL IMPULSO DE FLUIDO EN LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE EXTENSIÓN LATACUNGA.*** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Latacunga, 24 de enero del 2019

Valencia Viteri Guillermo Sebastián

C.C.: 1804633541



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTROMECAÁNICA

AUTORIZACIÓN

Yo, **Valencia Viteri, Guillermo Sebastián** autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE *publicar el trabajo de titulación: **DIMENSIONADO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DIDÁCTICO DE BOMBEO SOLAR FOTOVOLTAICO PARA EL ANÁLISIS CUANTITATIVO DEL IMPULSO DE FLUIDO EN LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE EXTENSIÓN LATACUNGA.** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.*

Latacunga, 24 de enero del 2019

Valencia Viteri Guillermo Sebastián

C.C.: 1804633541

DEDICATORIA

Este trabajo lo dedico a mis padres, quienes, con su comprensión, muchísimo apoyo y amor me han dado la fuerza y confianza necesaria para salir adelante y poder cumplir una meta más; a mi hermana, quien ha estado siempre a mi lado para escucharme y motivarme; a toda mi familia, abuelos, tíos y primos que han estado siempre a mi lado de igual manera apoyándome en todo momento y a mis amigos que me ha respaldado en toda ocasión.

Guillermo

AGRADECIMIENTO

A toda mi familia, que con su gran apoyo y motivación han sabido ser el soporte y guía durante mi vida universitaria.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga, al Departamento de Eléctrica y Electrónica en particular a todos los que conforman la Carrera de Ingeniería Electromecánica, por haberme permitido ser parte de esta gran comunidad.

A mis profesores por haber compartido sus conocimientos y experiencias por ser personas con alta calidad humana, con especial mención al Ingeniero Mario Jiménez quien colaboró con la realización del presente proyecto.

Guillermo

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CARÁTULA

CERTIFICACIÓN	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....	ii
AUTORIZACIÓN	iii
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	xii
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
RESUMEN.....	xv
ABSTRACT.....	xvi

CAPÍTULO I

PROBLEMÁTICA

1.1. Planteamiento del problema.....	1
1.2. Antecedentes	2
1.3. Justificación e importancia	3
1.4. Objetivos	4
1.4.1. Objetivo General	4
1.4.2. Objetivos Específicos	4

CAPÍTULO II	6
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	6
2.1. Energías renovables	6
2.2. Instrumentación industrial	7
2.3. Hidráulica	8
2.4. Radiación solar.....	8
2.5. Energía solar fotovoltaica.....	11
2.5.1. Sistemas de bombeo solar fotovoltaico.....	12
a. Definición	12
b. Configuraciones típicas	13
c. Componentes de un sistema de bombeo solar directo	19
2.5.2. Dimensionado sistema de bombeo solar directo.....	21
a. Determinación de las necesidades hidráulicas	21
b. Determinación del recurso solar.....	24
2.5.3. Dimensionado y selección del generador fotovoltaico.....	25
2.6. Características de bombas hidráulicas.....	30
2.6.1. Definición bomba hidráulica	30
2.6.2. Clasificación de las bombas hidráulicas	32
2.6.3. Elementos constitutivos bomba hidráulica	34
2.6.4. Altura útil o efectiva de una bomba hidráulica.....	36
2.6.5. Potencia de una bomba hidráulica	37
2.6.6. Rendimiento de una bomba hidráulica	38
2.6.7. Selección de la bomba hidráulica solar	39

2.7.	Análisis, dimensionado y selección en tuberías	40
2.7.1.	Número de Reynolds.....	42
2.7.2.	Diagrama de Moody	44
2.7.3.	Pérdidas en tuberías	45
2.7.4.	Tamaños de la tubería	48
2.7.5.	Cédula de la tubería	49
2.7.6.	Sellos o uniones para una tubería.....	50
2.7.7.	Conexiones para una tubería	50
2.7.8.	Dimensionado de tuberías	51
2.8.	Sistemas de sensado, medición, regulación y control.....	52
2.8.1.	Medidores de flujo	52
2.8.2.	Sensores de nivel de líquidos	54
2.8.3.	Reguladores o controladores de presión.....	55
2.9.	Hipótesis	57
2.10.	Cuadro de operacionalización de variables.....	57

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1	Antecedentes investigativos	59
3.2	Modalidad de la investigación	61
3.2.1	Bibliográfica.....	61
3.2.2	De campo.....	61
3.2.3	Experimental	62

3.3	Tipos de investigación.....	62
3.3.1.	Investigación aplicada.....	62
3.3.2.	Investigación correlacional.....	63
3.4.	Niveles de la investigación.....	63
3.4.1.	Exploratoria.....	63
3.4.2.	Descriptiva.....	64
3.5.	Población y muestra.....	64
3.6.	Técnicas de recolección de datos.....	64
3.6.1.	Instrumentos.....	66
3.6.2.	Validez y confiabilidad.....	66
3.7.	Técnicas de análisis de datos.....	67
3.8.	Técnicas de comprobación de la hipótesis.....	67

CAPÍTULO IV

RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

4.1.	Análisis de los resultados.....	68
4.1.1.	Análisis generador fotovoltaico.....	69
4.1.2.	Análisis subsistema motor - bomba.....	70
4.1.3.	Análisis subsistema tanque de agua.....	70
4.1.4.	Análisis subsistema de instrumentación.....	71
4.2.	Comprobación de la hipótesis.....	72

CAPÍTULO V

PROPUESTA

5.1.	Datos informativos de la propuesta	77
5.2.	Objetivos	78
5.2.1.	Objetivo general	78
5.2.2.	Objetivos específicos	78
5.3.	Antecedentes de la propuesta.....	78
5.4.	Justificación de la propuesta	80
5.5.	Fundamentación propuesta.....	80
5.6.	Diseño de la propuesta	80
5.7.	Metodología para ejecutar la propuesta	81
5.8.	Establecimiento de parámetros iniciales	81
5.8.1	Determinación de la altura hidráulica de bombeo	82
5.8.2	Análisis de la energía hidráulica.....	88
5.8.3	Análisis de la energía solar disponible	89
5.8.4	Dimensionado y selección de equipos fotovoltaicos	89
a.	Dimensionado y selección del generador fotovoltaico.....	90
b.	Dimensionado y selección motor – bomba solar	93
5.8.5	Selección instalaciones hidráulicas e instrumentación.....	95
a.	Red de tubería	95
b.	Válvula reguladora de caudal	96
c.	Contador de volumen de agua	97
5.8.6	Dimensionado y selección de conductor eléctrico y protecciones.....	97

5.9.	Diseño mecánico de la estructura mecánica	98
5.10.	Instalación del módulo didáctico	102
5.9.	Puesta a punto del equipo.....	103
5.10.	Pruebas y resultados.....	104
5.10.1.	Determinación del volumen de agua bombeado	104
5.10.2.	Determinación del rendimiento del sistema.....	106
CONCLUSIONES.....		108
RECOMENDACIONES		110
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		111
ANEXOS		117

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Necesidades medias de agua diaria para consumo humano</i>	23
Tabla 2 <i>Consumo medio diario de agua para animales de granja</i>	23
Tabla 3 <i>Volumen de agua medio diario para sembríos</i>	24
Tabla 4 <i>Coeficiente K para accesorios de tubería</i>	47
Tabla 5 <i>Diámetros tubería de PVC</i>	49
Tabla 6 <i>Operacionalización de variable independiente</i>	57
Tabla 7 <i>Operacionalización de variable dependiente</i>	58
Tabla 8 <i>Recolección de información</i>	65
Tabla 9 <i>Instrumentos utilizados en el desarrollo del proyecto</i>	66
Tabla 10 <i>Elementos a utilizarse en el proyecto investigativo</i>	76
Tabla 11 <i>Rugosidad absoluta en tuberías según el tipo de material</i>	83
Tabla 12 <i>Coeficientes energéticos (Enero a Junio)</i>	90
Tabla 13 <i>Coeficientes energéticos (Julio a Diciembre)</i>	91
Tabla 14 <i>Selección de paneles solares</i>	92
Tabla 15 <i>Pruebas de bombeo en horas de la mañana</i>	105
Tabla 16 <i>Pruebas de bombeo en horas de la tarde</i>	106
Tabla 17 <i>Determinación rendimiento sistema de bombeo con $G = 1000 \text{ W/m}^2$</i>	106
Tabla 18 <i>Determinación rendimiento sistema de bombeo con $G = 350 \text{ W/m}^2$</i>	107

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Energías renovables.....	7
Figura 2. Radiación Solar	9
Figura 3. Radiación Solar	10
Figura 4. El efecto fotovoltaico	11
Figura 5. Esquema típico de un sistema de bombeo fotovoltaico.....	13
Figura 6. Sistema de bombeo solar de mediana potencia.....	14
Figura 7. Sistema de bombeo solar con batería	16
Figura 8. Sistema de bombeo solar con	17
Figura 9. Sistema de bombeo solar.....	19
Figura 10. Paneles solares	19
Figura 11. Bombas Solares	20
Figura 12. Regulador o controlador	20
Figura 13. Tanque de agua	21
Figura 14. Bombas hidráulicas	31
Figura 15. Clasificación de bombas hidráulicas.....	32
Figura 16. Bomba desplazamiento positivo	33
Figura 17. Bomba centrífuga	34
Figura 18. Elementos constitutivos bomba centrífuga	35
Figura 19. Alturas en un sistema de bombeo	36
Figura 20. Esquema de potencias en una bomba	37
Figura 21. Flujo laminar	41

Figura 22. Flujo turbulento.....	42
Figura 23. Diagrama de Moody	45
Figura 24. Conexiones tubería	51
Figura 25. Métodos de medición de flujo.....	53
Figura 26. Medidores de nivel	55
Figura 27. Regulador de presión	56
Figura 28. Proyectos de Electrificación Rural no Gubernamentales.....	60
Figura 29. Esquema sistema de bombeo solar directo.....	75
Figura 30. Datos radiación solar mensual Latacunga.....	89
Figura 31. Panel solar policristalino.....	92
Figura 32. Panel solar monocristalino	92
Figura 33. Bomba solar SDS-T-128 con regulador de carga.....	94
Figura 34. Análisis estático 1 Masa 1000 Kg.....	99
Figura 35. Análisis estático 1 factor de seguridad	99
Figura 36. Análisis estático 1 Deformación.....	100
Figura 37. Análisis estático 2 con masa distribuida 1000Kg.....	100
Figura 38. Análisis estático 2 factor de seguridad	101
Figura 39. Análisis estático 2 deformación	101
Figura 40. Detalle activación dip - switch	103
Figura 41. Medición irradiancia solar en horas de la mañana	104
Figura 42. Medición irradiancia solar en horas de la tarde	105

RESUMEN

En la actualidad en nuestro país y en el mundo entero, la mayoría de aparatos utilizados por el ser humano funcionan con electricidad, un ejemplo, son los sistemas de bombeo de agua. Es factible implementar sistemas de bombeo que funcionen con energía limpia como la energía solar, cambiando la forma de obtención de energía eléctrica de fuentes de energía no renovables a fuentes renovables, por lo tanto, en este proyecto se dimensiona e implementa un módulo didáctico de bombeo fotovoltaico con conexión directa para uso en prácticas de laboratorio de estudiantes de Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE” extensión Latacunga. Este tipo de sistema al no contar con almacenamiento de energía eléctrica en baterías; funcionará solamente en el día en horas de sol. El módulo implementado funciona con un generador fotovoltaico de 85W que produce la energía eléctrica para la operación de una bomba solar sumergible de la misma potencia. El módulo didáctico permite cuantificar el volumen de agua impulsado a un determinado valor de irradiación, así mismo permite determinar la eficiencia del sistema moto – bomba en base a la energía hidráulica y la potencia absorbida por la moto – bomba. En la implementación de este tipo de sistemas la inversión es alta inicialmente obteniendo rédito económico a largo plazo.

PALABRAS CLAVE:

- **ENERGÍA RENOVABLE**
- **ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA**
- **BOMBAS SOLARES**
- **BOMBEO DE AGUA**

ABSTRACT

Nowadays in our country and in the whole world, the majority of devices used by the human being work with electricity, for example, water pumping systems. It is feasible to implement pumping systems that work with clean energy such as solar energy, changing the way of obtaining electrical energy from non-renewable energy sources to renewable sources, therefore, in this project a didactic pumping module is dimensioned and implemented photovoltaic with direct connection for use in laboratory practices of students of the University of the Armed Forces "ESPE" extension Latacunga. This type of system does not have storage of electrical energy in batteries; It will only work during the day in sunny hours. The implemented module works with a 85W photovoltaic generator that produces the electrical energy for the operation of a submersible solar pump of the same power. The didactic module allows to quantify the volume of water driven at a certain irradiation value, as well as to determine the efficiency of the motor - pump system based on the hydraulic energy and the power absorbed by the motor - pump. In the implementation of this type of systems the investment is high initially obtaining long-term economic return.

KEY WORDS:

- **RENEWABLE ENERGY**
- **PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY**
- **SOLAR PUMPS**
- **WATER PUMPI**

CAPÍTULO I

PROBLEMÁTICA

1.1. Planteamiento del problema

En el mundo actual, la humanidad busca nuevas fuentes de energía que sean amigables con el medio ambiente y sobre todo que sean renovables, esto por la contaminación, el costo y la veloz manera en que se agotan los combustibles fósiles. En el Ecuador en el último siglo se ha utilizado como fuente de energía la energía hidráulica que es de fuente renovable y la energía térmica proveniente de combustibles fósiles que es energía no renovable. El país es rico en lo que se refiere a recursos renovables en forma de radiación solar, estos índices de insolación se encuentran entre los más altos a nivel mundial. (Mena Pachano, 2018)

Por lo mencionado con anterioridad, la gran importancia de utilizar la energía proveniente del sol en forma de energía fotovoltaica usada en la extracción de agua para brindar a zonas rurales aisladas de la red eléctrica una fuente de energía no convencional para realizar actividades diarias. Entonces es una necesidad implementar sistemas que trabajen independientemente del servicio eléctrico que ayuden a obtener elementos naturales básicos como es el agua ya sea para su consumo o para la agricultura, una clarísima opción es la implementación de sistemas que funcionen mediante las energías renovables como los módulos de bombeo fotovoltaico que funcionan mediante la captación de la energía solar para la extracción de agua subterránea, por ende, estos sistemas de bombeo fotovoltaico son la mejor alternativa para solventar la demanda de

agua y así mejorar la calidad de vida de muchas de las zonas aisladas, además se fomenta la utilización de energías limpias con el medio ambiente.

Por lo expuesto; actualmente la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE” extensión Latacunga necesita un módulo de entrenamiento de bombeo activado por medio de un sistema solar fotovoltaico, para que el proceso de enseñanza y aprendizaje no se vea debilitado al no ir a la par con la actual matriz energética fomentada por el gobierno y que no se amenore la formación integral para el futuro profesional, dentro de este campo se encuentra a energía solar fotovoltaica.

1.2. Antecedentes

Desde hace mucho tiempo atrás las energías renovables han sido consideradas como una parte muy importante en la energía utilizada por el ser humano, “Las aplicaciones más lejanas, como un antecedente histórico, se sitúan principalmente en el empleo de fuentes energéticas inagotables en el transporte”. (Erenovable, 2015)

La demanda de energía y de servicios conexos, con miras al desarrollo social y económico y a la mejora del bienestar y la salud de las personas, va en aumento. Todas las sociedades necesitan de servicios energéticos para cubrir las necesidades humanas básicas (por ejemplo, de alumbrado, cocina, ambientación, movilidad y comunicación) y para los procesos productivos. (IPCC, 2011)

Para establecer un desarrollo viable en sectores rurales es necesario utilizar las energías renovables, este tipo de energía tiene el potencial de mejorar la calidad de vida de las personas en estas zonas. Dentro de este aspecto una de las alternativas más eficientes y efectivas es el aprovechamiento de la energía solar, mediante instalaciones

fotovoltaicas domésticas. “La energía solar fotovoltaica es una tecnología que genera corriente continua por medio de semiconductores cuando estos son iluminados por un haz de fotones”. (Grupo NAP, 2002)

Una de las principales necesidades en estas zonas rurales es el aprovechamiento de agua para uso doméstico, de esta manera es necesario implementar sistemas de bombeo fotovoltaico, estos sistemas tienen como principales beneficios o características las de ser sistemas relativamente pequeños, de gran fiabilidad y no requieren de ningún tipo de combustible para su funcionamiento.

El bombeo de agua con energía solar fotovoltaica es una aplicación de especial interés en sistemas aislados. Esta tecnología ha demostrado a lo largo de los años ser un modo efectivo de suministro de agua potable para usuarios y comunidades rurales, así como para aplicaciones agrícolas (irrigación) y ganaderas (abrevaderos). (Abella & Romero, 2017)

1.3. Justificación e importancia

En la actualidad nuestro planeta se ve afectado por la contaminación excesiva producida por el uso de energías convencionales ya que estas utilizan combustibles fósiles; combustibles que son muy perjudiciales para el medio ambiente con especial mención al petróleo, esto ha obligado a la humanidad a buscar otros tipos de energías alternativas amigables con el medio ambiente.

Una alternativa como fuente de energía es la brindada por el sol como energía fotovoltaica, aprovechando la energía solar fotovoltaica por elementos electromecánicos se la puede utilizar para el funcionamiento de muchos sistemas que necesitan una fuente

de energía, como es el caso del bombeo de agua, un sistema de bombeo solar fotovoltaico es muy eficiente tanto técnicamente como económica, es decir son sistemas que requieren poco mantenimiento y su instalación es simple.

Es de mucha importancia el fomentar la investigación de futuros profesionales en el área de las energías renovables para así concienciar a la sociedad y poder lograr paso a paso mitigar los daños que produce el consumo de energías que funcionan con combustibles fósiles, los cuales causan un gran daño al medio ambiente.

Un dispositivo que funciona con energía eléctrica que puede provenir de fuentes renovables como el sol puede ser un sistema de bombeo, estos sistemas son indispensables en lugares poblados y aislados donde no cuentan con alcantarillado o red de agua potable además de no poseer una adecuada red eléctrica o no tenerla totalmente.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Dimensionar e implementar un módulo didáctico de bombeo solar fotovoltaico para cuantificar el volumen de agua impulsada por medio de una bomba que funciona con energía solar en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Determinar las características de funcionamiento de un sistema de bombeo solar fotovoltaico y diseñar el sistema con dichas características

- Dimensionar e implementar el sistema de bombeo solar fotovoltaico para el uso en pruebas en el laboratorio de Energías Renovables.
- Cuantificar el volumen de fluido generado por el impulso de la bomba solar mediante el aprovechamiento de la radiación solar diaria a una altura preestablecida en el sector en que se implementará el módulo didáctico.
- Calcular el rendimiento del sistema moto – bomba solar; que se da por la relación entre la potencia de entrada y la potencia de salida.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1. Energías renovables

Las energías renovables son un tipo de energía que proviene de fuentes naturales inagotables y amigables con el medio ambiente. Este tipo de energías limpias son una alternativa al uso de energías convencionales o energías que usan combustibles fósiles. La energía renovable proveniente de fuentes alternativas como lo es el sol (ver figura 1), representa un porcentaje mínimo en la matriz energética de una nación, por lo que algunos gobiernos están promoviendo e incentivando a las personas a dar el gran paso y cambiar de la utilización de combustibles fósiles al uso de fuentes renovables para disminuir el impacto ambiental del planeta y mejorar la eficiencia energética.

A escala humana las energías renovables son inagotables y se producen de forma continua; es decir se renuevan continuamente, contrario de los combustibles fósiles que se van agotando o acabando en un plazo determinado; las reservas de combustibles fósiles existen pocas cantidades. Existen distintas formas de energías renovables y las principales son: la eólica, solar, biomasa, hidráulica, geotérmica y las energías marinas. El sol es el responsable directa o indirectamente de producir o de que existan la mayoría de energías renovables; la excepción es la energía geotérmica y la energía de las mareas. (Instituto Tecnológico de Canarias, S.A., 2008).



Figura 1. Energías renovables

Fuente: (Instituto Tecnológico de Canarias, S.A., 2008)

2.2. Instrumentación industrial

La instrumentación industrial es una ciencia que se encarga del estudio de los elementos que existen dentro de un proceso o planta. Estos dispositivos tienen la función dependiendo de su construcción la de medir, registrar o controlar las variables de un proceso con la finalidad de lograr optimizar los recursos utilizados.

A comienzos de la era industrializada, la operación de todos los procesos se los realizaba con control manual, es decir las magnitudes se las controlaba con instrumentos simples, como válvulas manuales, termómetros, manómetros, etc., este tipo de control era suficiente ya que los procesos eran relativamente simples. Pero con el tiempo estos procesos han ido aumentando gradualmente su complejidad y han exigido que los instrumentos de control y medición se automaticen también progresivamente. Con esta evolución de los instrumentos; el trabajo por parte de los operarios se ha reducido y facilitado optimizando así el tiempo, recursos y sobre todo dinero.

En la industria de las energías renovables; específicamente con la energía solar se requiere medir variables importantes como la irradiancia solar la cual es la potencia del

sol brindada en un tiempo determinado, la irradiación que es la energía del sol otorgada recibida en un tiempo, además del tiempo que duran estas magnitudes. Para cálculos posteriores para implementar sistemas solares fotovoltaicos es importante conocer principalmente dos magnitudes que es la radiación solar en la superficie terrestre, para esto, el instrumento más utilizado es el medidor de radiación global o piranómetro, y la duración de esta en horas y en qué horas del día se da mayormente para lo cual el instrumento más utilizado es el heliógrafo. (Creus, Instrumentación Industrial, 2006)

2.3. Hidráulica

La Hidráulica es una ciencia aplicada y semiempírica que forma parte de la Mecánica y se encarga del estudio del equilibrio y el movimiento de los fluidos, es una ciencia aplicada y semiempírica ya que las fórmulas que permiten resolver problemas vienen dadas por la práctica, corregidas con coeficientes deducidos empíricamente, además que en el estudio de los líquidos se los toma como fluidos perfectos es decir homogéneos, incompresibles y no viscosos; a los cuales se les aplica leyes de la Mecánica también corregidas empíricamente. La Hidráulica se divide en dos partes según el estudio de las condiciones del fluido, es decir, si el fluido están en reposo o equilibrio la parte encargada es la Hidrostática y la parte que estudia a los fluidos en movimiento es la Hidrodinámica. (López, 2007)

2.4. Radiación solar

La radiación solar es un flujo de energía emitida por el sol como ondas electromagnéticas que se encuentran a diferentes frecuencias. A este flujo de energía

que llega a la Tierra se la conoce como irradiancia, esta magnitud mide la cantidad de energía en un determinado tiempo y área, si el tiempo se mide en horas (h) y la irradiancia en vatios sobre metro cuadrado (W/m^2), la radiación solar es expresada en vatios hora sobre metro cuadrado (Wh/m^2) por día, esta magnitud también se la puede expresar en horas solares pico (HSP); y tiene una equivalencia igual a la energía del sol recibida en la Tierra durante una hora con un valor promedio de irradiancia de $1000W/m^2$ es así que podemos afirmar que una hora de luz solar corresponde a $1 KWh/m^2$. A continuación, se muestra una figura 2 sobre la radiación solar:

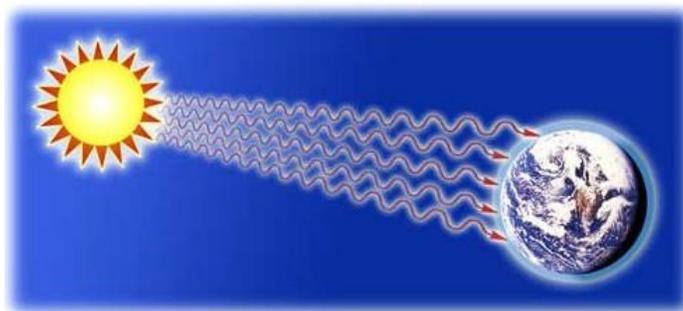


Figura 2. Radiación Solar
Fuente: (BlogMaster, 2018)

Por otra parte; la radiación electromagnética es energía del sol que viaja a través del espacio, una parte de esta energía llega a la atmósfera, es absorbida una parte por esta y otra parte por el suelo, y también se refleja directamente otra parte al espacio desde el suelo. Por esta razón es que llega a la superficie terrestre menos de la mitad de la radiación solar, y es esta la parte en nuestro planeta Tierra la energía que podemos utilizar con fines energéticos. (Instituto Tecnológico de Canarias, S.A., 2008)

A nuestro planeta la radiación solar llega de tres formas diferentes y estas son: la radiación directa que es la radiación que no se desvía ni cambia de dirección y nos llega directamente del sol; sin haber chocado con nada en su camino, la radiación difusa; es la radiación que después de haber chocado con cualquier elemento de la atmósfera (nubes, contaminantes, polvo, etc.) nos llega por lo cual ha cambiado de dirección, y la radiación reflejada o albedo que es el tipo de radiación que desde la superficie terrestre se refleja; tiene mucha importancia en zonas con agua (como puede ser cerca del mar o de una presa), zonas con nieve u otra zona donde exista reflexión importante. A más de la radiación global ilustrada en la figura 3 que se da por suma de la radiación difusa y la radiación directa. (Instituto Tecnológico de Canarias, S.A., 2008)

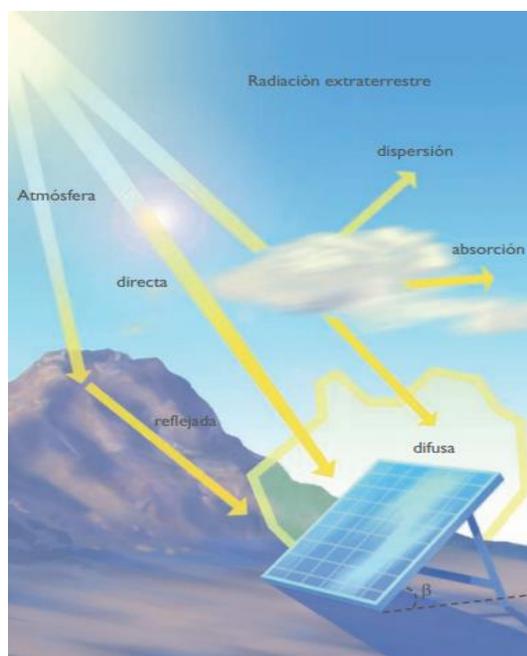


Figura 3. Radiación Solar

Fuente: (Instituto Tecnológico de Canarias, S.A., 2008)

2.5. Energía solar fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica es una rama de las energías renovables; este tipo de energía se la aprovecha al transformar de una manera directa los rayos del sol en energía eléctrica. El sol irradia energía la cual es percibida por el planeta Tierra en forma de ondas electromagnéticas; estas ondas son la energía solar fotovoltaica. La radiación emitida por el sol hacia la Tierra es de alrededor de $1.7 \times 10^{11} MW$.

La energía del sol es transformada directamente en electricidad por la energía fotovoltaica utilizando minerales (cristales de arseniuro de galio y de silicio), que tienen la capacidad para realizar esta conversión, el efecto fotovoltaico es mostrado en la figura 4. La luz es convertida en corriente eléctrica por las células fotovoltaicas. Estos materiales se han utilizado en tecnología como calculadoras, relojes, neveras de energía solar, botes, en postes de socorro para las autopistas, en dispositivos de ayuda en la navegación, en teléfonos remotos, casas rurales, y se instalan en coches que funcionan con energía solar que tienen que tener una gran área para recibir la energía solar. (Creus, Energías Renovables, 2014)

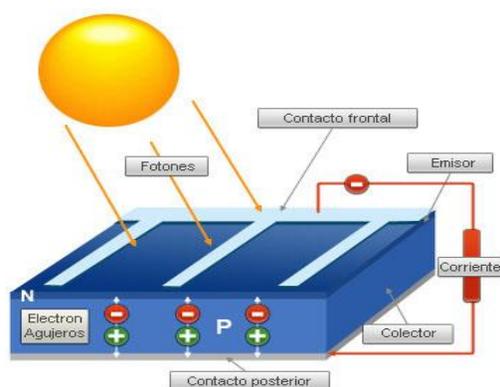


Figura 4. El efecto fotovoltaico
Fuente: (Zytech Solar, 2018)

En la transformación de energía solar a energía eléctrica directa se utiliza la célula fotovoltaica, esta se la designa con las letras mayúsculas PV, este término viene dado por las palabras “photo” que significa luz y “voltaics” voltaje eléctrico, la célula fotovoltaica no contiene partes móviles no poluciona y no consume combustibles fósiles. (Creus, Energías Renovables, 2014)

El efecto con el cual funciona la célula se produce cuando la radiación solar choca o llega sobre un material semiconductor, en el cual se producen o crean simuladamente dos regiones una positiva de tipo P que tiene cantidades muy pequeñas de boro con orificios cargados positivamente y otra región negativa de tipo N que contiene electrones adicionales. Cuando estos materiales se juntan y además son expuestos al sol se genera un campo electrostático constante, este genera un movimiento de electrones (corriente continua) que circulan cuando se cierra con una carga externa. (Creus, Energías Renovables, 2014)

2.5.1. Sistemas de bombeo solar fotovoltaico

a. Definición

A un sistema de bombeo fotovoltaico se lo define como a un conjunto de elementos o subsistemas los cuales son mecanismos electrónicos, mecánicos y eléctricos, estos componentes son los que permiten captar la energía en forma de ondas provenientes del sol y transformarla en energía eléctrica continua y de esta forma poder accionar la bomba la cual permitirá sustraer el agua subterránea.

Un sistema de bombeo solar fotovoltaico ilustrado en la figura 5, está conformado generalmente por un subsistema de paneles solares, un subsistema motor-bomba, se puede disponer por un subsistema de acondicionamiento de potencia conectado entre el subsistema generador fotovoltaico y la bomba, conjunto de tuberías y el depósito donde se almacena el agua. Para protección del sistema de la bomba principalmente se debe instalar elementos controladores de nivel tanto en el pozo como en el depósito de agua para protección contra el funcionamiento en vacío y el desperdicio de agua. Para este tipo de sistemas de bombeo fotovoltaico existen dos tipos de aplicaciones; en el uso para riego en el ámbito agrícola y para el abastecimiento de agua en zonas rurales aisladas de la red eléctrica. (Abella & Romero, 2017)

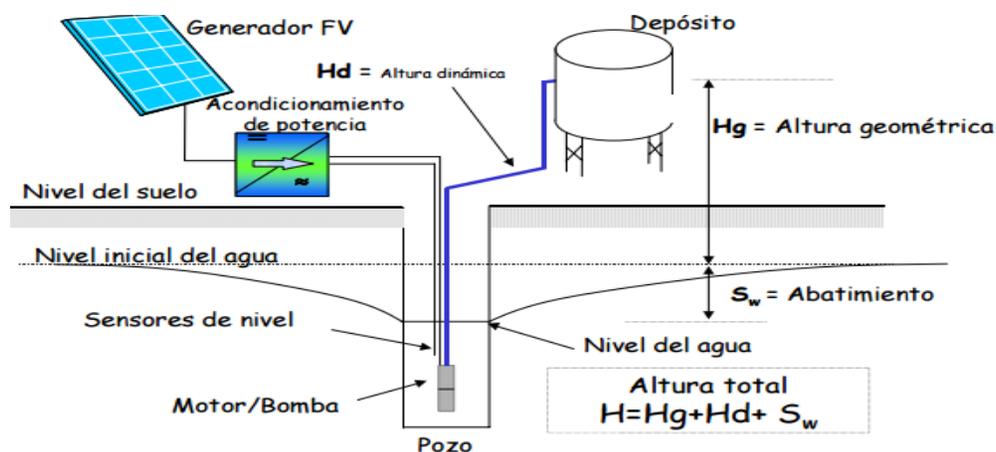


Figura 5. Esquema típico de un sistema de bombeo fotovoltaico
Fuente: (Abella & Romero, 2017)

b. Configuraciones típicas

Las configuraciones de un sistema de bombeo solar fotovoltaico están determinadas por el tipo de generador de energía fotovoltaica, el tipo de bomba y el motor a utilizar y así como también la potencia instalada, se pueden distinguir configuraciones como

sistemas de bombeo con motores de corriente directa (DC), con motores de corriente alterna (AC), sistemas de bombeo con baterías y sistemas de bombeo con convertidores de frecuencia, así como también sistemas de bombeo solar con conexión directa. (Abella & Romero, 2017)

- **Sistemas de bombeo según su potencia:** Según su potencia se distinguen los sistemas de bombeo de baja potencia que están entre los $50 W_p$ a $400 W_p$ y poseen generalmente como elementos un motor de corriente continua y una bomba de desplazamiento positivo de membrana, para mejorar el acoplo entre panel-motor existe un convertidor DC/DC. También están los sistemas de media potencia que van desde los $400 W_p$ a los $1500 W_p$ en estos sistemas se distinguen dos configuraciones la primera que lleva una bomba sumergible con motor asíncrono controlado por un inversor de frecuencia y la segunda compuesta por un motor de corriente continua sin escobillas. Y por último tenemos los sistemas de bombeo fotovoltaico que utilizan convertidores de frecuencia industriales con potencias superiores a los kW_p , son sistemas poco eficientes y con diseños muy complejos. A continuación, en la figura 6 se muestra un ejemplo. (Abella & Romero, 2017)



Figura 6. Sistema de bombeo solar de mediana potencia
Fuente: (RiegoSolar , 2018)

- **Sistemas de bombeo con motores de corriente continua:** Son sistemas que están constituidos básicamente por un generador fotovoltaico, un motor de corriente continua (DC), una bomba, un convertidor de corriente DC/DC este es opcional, pero se recomienda para un mejor rendimiento del sistema y un depósito de almacenamiento este último también es opcional. El sistema de paneles fotovoltaicos suministra energía con variaciones dependiendo de la radiación solar incidente en el día, es aquí donde tiene importancia el convertidor DC/DC ya que ajusta la impedancia entre el generador fotovoltaico y el subsistema motor-bomba para utilizar constantemente la máxima potencia disponible. (Abella & Romero, 2017)

En los sistemas de bombeo fotovoltaico directamente acoplados, la bomba es accionada por un motor de corriente continua que recibe la energía directa del generador fotovoltaico es necesario tener en cuenta una que otra consideración: complementar la instalación con un depósito de almacenamiento de agua para asegurar un suministro continuo incluso en períodos de poco sol si el sistema de bombeo de agua es para uso doméstico. (Abella & Romero, 2017)

- **Sistemas de bombeo con motores de corriente alterna:** Son sistemas conformados por un subsistema de generación fotovoltaica, un convertidor DC/AC, un motor de corriente alterna (AC), una bomba y opcionalmente un depósito de almacenamiento. La energía del sol captada por los paneles fotovoltaicos suministra energía al motor en forma de corriente continua y ya que el motor es de corriente alterna se debe incorporar un convertidor de corriente continua a corriente alterna monofásica o trifásica. Una de las ventajas de los motores de

corriente alterna es su construcción simple lo cual los hace robustos y su mantenimiento es muy bajo con respecto a los motores de corriente continua, haciéndolos la mejor opción en aplicaciones de sistemas de bombeo FV sumergibles y de altas potencias. (Abella & Romero, 2017)

- **Sistema de bombeo con baterías:** Este sistema que muestra en la figura 7, está constituido como cualquier otro sistema de bombeo, por un generador fotovoltaico, un subsistema motor-bomba, si se requiere un depósito de almacenamiento del agua pero a más de esto ya que el sistema es aislado se requerirá un sistema de baterías para poder almacenar la energía emitida por el generador fotovoltaico, las baterías utilizadas en este tipo de sistemas generalmente suelen ser estacionarias con un ciclo de descarga profunda, las baterías se cargan todo el día incluso si el sistema se encuentra en funcionamiento. (Abella & Romero, 2017)



Figura 7. Sistema de bombeo solar con batería

Fuente: (Infrago, 2018)

Si el motor es de corriente alterna se incluirá un convertidor DC/AC para que transforme la corriente continua además de mantener el voltaje estable proveniente de las baterías, y si el motor es de corriente continua se requerirá un

subsistema convertidor DC/DC para que regule el voltaje del banco de baterías aun nivel establecido. La principal ventaja de este tipo de sistemas es que se tendrá abastecimiento de agua incluso cuando no se disponga de radiación solar por el almacenamiento de energía en el banco de baterías razón por lo cual este sistema tiene un costo más elevado. (Abella & Romero, 2017)

- **Sistemas de bombeo con convertidores de frecuencia:** Son sistemas de bombeo fotovoltaicos con rango de media y alta potencia estos poseen como elemento especial los convertidores de frecuencia (FC) conectados directamente al subsistema de generación fotovoltaica para poder accionar motores de inducción asíncrono los cuales están acoplados a bombas centrífugas, es decir que la incorporación de estos convertidores de frecuencia a un sistema de bombeo fotovoltaico es una solución para poder utilizar bombas convencionales existentes en el mercado mundial. Este tipo de sistemas se ilustran en la figura 8. (Abella & Romero, 2017)

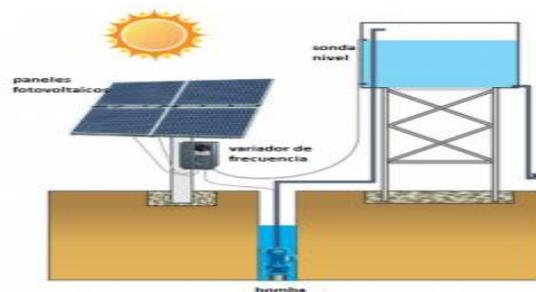


Figura 8. Sistema de bombeo solar con variador de frecuencia
Fuente: (Varitech , 2018)

Los convertidores de frecuencia (FC) son elementos electrónicos acondicionadores de potencia con una similitud a los inversores, la diferencia radica en que este dispositivo puede recibir corriente continua como la proveniente de un generador fotovoltaico con un amplio rango de voltaje, controlando la frecuencia y voltaje con los que se requiere que trabaje un motor AC, todo esto es posible ya que el convertidor de frecuencia consta de elementos electrónicos como son un rectificador, un circuito capacitor intermedio y un inversor. Con este dispositivo se obtiene dos beneficios, el primero es la amplia disponibilidad de elección de sistemas motor/bomba en el mercado y como segundo la factibilidad de aumentar el rango de potencias. (Abella & Romero, 2017)

- **Sistemas de bombeo solar con conexión directa:** Este tipo de sistema ilustrado en la figura 9, es por lo general más utilizado ya que es menos costoso y requiere de menos mantenimiento al no poseer baterías donde se almacene la energía, la corriente generada por los paneles solares es trasladada directamente al subsistema motor-bomba. Por este motivo este tipo de sistemas sólo funcionan durante el día, y la cantidad de fluido bombeado dependerá directamente de la radiación que exista en el lugar de implementación de los paneles solares. Debido a que la cantidad de luz brindada por el sol o radiación no es constante la eficiencia de una bomba varía, por lo general en horas del mediodía la eficiencia de la bomba puede ser alta, pero en las primeras horas de la mañana y últimas de la tarde la eficiencia de la bomba puede bajar un 25% e incluso más en días nublados, por estos motivos se deberá realizar un óptimo diseño del sistema de bombeo solar. (Aqueveque Medina, 2009)

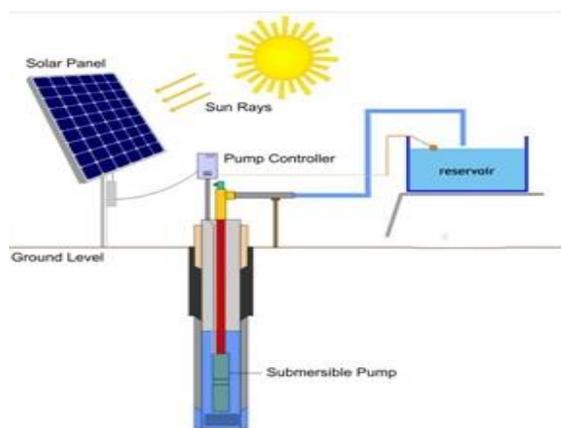


Figura 9. Sistema de bombeo solar con conexión directa
Fuente: (Solenergy, 2018)

c. Componentes de un sistema de bombeo solar directo

Como elementos principales constitutivos de un sistema de bombeo solar fotovoltaico con conexión directa tenemos principalmente: los paneles solares, el subsistema motor-bomba, el regulador de corriente o controlador de la bomba, y si la situación requiere algunos dispositivos de control, protección, contadores de energía y transformadores. A continuación, se explicará los principales de ellos:

- **Paneles solares:** Conocido técnicamente como paneles fotovoltaicos expuestos en la figura 10, este elemento es el encargado de captar la luz solar (protones) energía en forma de radiación y transformarla en energía eléctrica.



Figura 10. Paneles solares
Fuente: (Merino, 2012)

- **Sistema motor - bomba:** está conformado por un motor (ver figura 11) que transforma la energía eléctrica proporcionada por los paneles fotovoltaicos (energía eléctrica continua) en energía mecánica que acciona a una bomba, esta última es una máquina hidráulica que convierte a su vez esta energía mecánica, en energía hidráulica para poder impulsar el fluido (agua). Este sistema puede ser de superficie, sumergible o flotante. (Abella & Romero, 2017)



Figura 11. Bombas Solares

Fuente: (Tecnología y material sustentables, 2018)

- **Controlador del subsistema motor – bomba:** llamado también regulador de carga (ver figura 12) es un dispositivo electrónico que tienen como función como su mismo nombre lo indica el de regular o controlar la cantidad de energía que viene del generador fotovoltaico, permitiendo así que la bomba funcione constantemente sin importar la radiación existente en el día, es decir controla que la bomba de agua solar funcione de forma óptima.

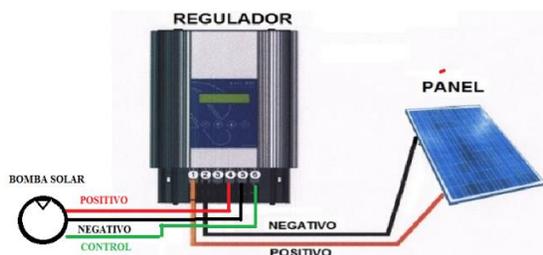


Figura 12. Regulador o controlador de un sistema de bombeo solar

Fuente: (Ingemecánica, 2018)

- **Depósito de fluido o acumulador:** es un elemento (ver figura 13) del sistema de bombeo solar fotovoltaico de conexión directa donde se almacenará el agua procedente del lugar de extracción, este elemento puede ser de varios materiales como piedra, fibra de vidrio, etc., generalmente los depósitos para agua están fabricados de material de polietileno de fácil instalación y abastecimiento.

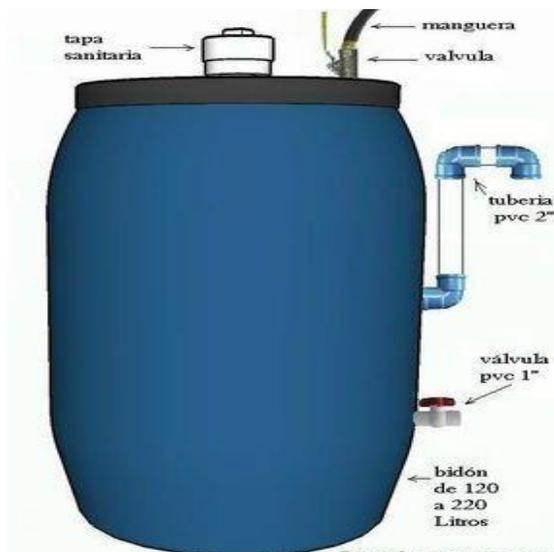


Figura 13. Tanque de agua
Fuente: (Pinteres, 2018)

2.5.2. Dimensionado sistema de bombeo solar directo

a. Determinación de las necesidades hidráulicas

Como primera instancia, hay que saber la cantidad de agua diaria que se necesita, esto dependerá directamente de la aplicación del sistema de bombeo solar, para poder satisfacerla. Las distintas demandas o necesidades son de agua para consumo humano, agua para consumo de animales domésticos y por último agua para riego de cultivos o sembríos. (Abella & Romero, 2017)

Entonces para poder realizar un adecuado dimensionado de un sistema de bombeo fotovoltaico se deberá tener muy en cuenta el tipo de consumo que se necesita. Para obtener este consumo diario idealmente se puede tomar valores y calcularlos o en su defecto hablar directamente con la población donde se va a implementar el sistema, en cualquier caso, de que no sea factible realizar lo propuesto anteriormente, para orientarse puede servir valores mínimos que se indican en las tablas 1, 2 y 3. (Abella & Romero, 2017)

Como segunda instancia, hay también que separar a la demanda de agua en factor de su variable tiempo, es decir que se puede distinguir si el consumo de agua va a ser de forma continua donde se puede utilizar el agua tanto en el día como en la noche, verano o invierno, como se da en casos de residencias de campo, donde existe necesidades de agua por persona. Si este es el caso es necesario contar con un adecuado depósito de almacenamiento y baterías que almacenen la energía brindada por los paneles solares en horas de sol, y si es un sistema de bombeo solar directo solo es necesario un adecuado depósito de almacenamiento de agua. Y si el consumo de agua es estacional, como se da en circunstancias de riego de sembríos, donde el sistema funciona solo en horas donde exista radiación solar tampoco es necesario el uso de baterías. (Abella & Romero, 2017)

De todas maneras, saber con exactitud la cantidad correcta de volumen diario de agua es difícil porque depende de la calidad de vida de la población y otros factores más, generalmente y según la Organización Mundial de la Salud (OMS) se puede establecer de 50 litros diarios por persona como un nivel de referencia y puede llegar hasta 100 litros diarios y más. A continuación, se muestra tablas que ayudan a orientarse en el volumen

de agua que se vaya a necesitar según las necesidades humanas, alimentación de animales, riego, etc. (Abella & Romero, 2017)

Tabla 1

Necesidades medias de agua diaria para consumo humano

Consumo humano			
Por persona	Litros	Servicios	Litros
Mínimo	10	Cada ducha	20
Países subdesarrollados	30	Bañera llena	120
Países desarrollados	300	Cisterna	24
		Lavabo lleno	8
		Lavavajillas	16 l/min
		Lavadora	20 l/min
		100 m ² césped	600

Fuente: (Abella & Romero, 2017)

Tabla 2

Consumo medio diario de agua para animales de granja

Consumo de agua para animales	
Tipo de animal	Litros/día/animal
Caballo	40
Buey	20
Ganado vacuno	50
Vaca lechera	140
Cerdo	20
Oveja	5
Cabra	5
Aves de corral	0,1

Fuente: (Abella & Romero, 2017)

Tabla 3*Volumen de agua medio diario para sembríos*

Consumo estimado de agua para agricultura	
Tipo de cultivo	<i>m³/hectárea</i>
Granjas rurales	60
Arroz	100
Cereales	45
Caña de azúcar	66
Algodón	55

Fuente: (Abella & Romero, 2017)

b. Determinación del recurso solar

Para que se pueda dimensionar un generador fotovoltaico con adecuada potencia que sustente al sistema de bombeo solar es necesario primero conocer la radiación solar disponible en la región a implementar el sistema, esta radiación cambia constantemente en el día y en cada año por motivos ya sea por cambio de estaciones y condiciones geográficas o climáticas propias de cada región. La cantidad de radiación también depende directamente de su orientación relativa al sur o norte. (Arija González, 2010)

Luego de tener en cuenta estas consideraciones se necesita conocer la radiación media global o promedio de cada mes sobre la zona en que implementará el sistema de bombeo fotovoltaico, para lo cual se utilizará como ayuda datos de radiación obtenidos por fuentes como son las mostradas a continuación:

- POWER RESOURCE VIEWER (NASA)
- INAMHI

Una vez obtenidos los datos anteriores sobre radiación media mensual a más de la energía hidráulica disponible en el sector, se podrá obtener el valor de radiación con el que se podrá realizar un eficiente cálculo con el que el generador será capaz de satisfacer las necesidades del sistema en todo momento, este valor se da en el denominado mes de dimensionado. Estos valores dependen o se obtienen por el cociente entre la energía hidráulica y la energía solar de cada mes, si es máximo este valor, es donde energéticamente hablando es el mes más desfavorable y por ende es el mes donde se deberá realizar los cálculos para el dimensionado del generador. (Arija González, 2010)

2.5.3. Dimensionado y selección del generador fotovoltaico

Al momento de dimensionar el generador fotovoltaico, en primearas instancias se supone que este funciona en condiciones estándar o normales que es a temperatura ambiente de 25°C y a $1000 \text{ W}/\text{m}^2$, además de que trabaja siempre a su máxima potencia, en la realidad esto no se da en la práctica porque la potencia de salida del generador fotovoltaico es menor a la potencia máxima ya que la irradiancia es menor a $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ mientras transcurre el día y pérdidas en el rendimiento estos problemas se regulan con factores adecuados. (Arija González, 2010)

Entonces con respecto a lo dicho anteriormente la energía eléctrica que los paneles fotovoltaicos tienen que suministrar al sistema de bombeo fotovoltaico es igual al cociente entre la energía hidráulica requerida y el rendimiento energético medio diario de los paneles. La energía eléctrica que brindan los paneles solares depende de factores como: radiación solar, temperatura media de funcionamiento de las células fotovoltaicas, el

sector o punto donde trabaja el sistema de bombeo fotovoltaico y el umbral de irradiancia de bombeo. (Abella & Romero, 2017)

Antes de calcular la potencia que necesitará el generador fotovoltaico para abastecer al sistema de bombeo solar y una vez establecidas las necesidades de volumen de agua, se deberá calcular la energía hidráulica mediante la expresión siguiente:

$$E_h = \rho g V h \text{ [J]} \quad (1)$$

Donde:

E_h : energía hidráulica está julios [J]

ρ : la densidad el agua está en [kg/m^3]

g : aceleración de la gravedad está en [m/s^2]

V : volumen de agua diario de un sistema de bombeo está en [m^3]

h : altura total está en [m]

Para poder calcular esta energía hidráulica antes es necesario conocer la altura total a la que se deberá llevar el fluido en este caso agua, la altura total dependerá de la suma de altura estática o geométrica y de la dinámica que son pérdidas hidráulicas en las tubería o elementos de esta y se estudiará en un apartado más adelante. También se puede transformar la forma de medir la energía hidráulica de julios a vatios por hora con una relación que dice que 1Wh es igual a 3600J.

Una vez obtenida la energía hidráulica es posible calcular el área de los módulos fotovoltaicos necesaria para poder suministrar energía eléctrica mediante la siguiente expresión:

$$A = \frac{E_e}{\eta_{fg} I} [m^2] \quad (2)$$

Donde:

A : área activa de los módulos fotovoltaicos está en $[m^2]$

E_e : energía eléctrica diaria necesaria está en $[kWh/día]$

η_{fg} : rendimiento medio diario del generador en condiciones de operación

I : irradianción $[kWh/día \times m^2]$

Existe una expresión que indica una relación entre la energía eléctrica y la energía hidráulica necesaria con el rendimiento medio mensual del subsistema motor – bomba y también una expresión para el rendimiento medio diario del generador en condiciones de operación estas expresiones son las siguientes:

$$E_e = \frac{E_h}{\eta_{mb}} [Wh] \quad (3)$$

Donde:

E_e : energía eléctrica necesaria en $[Wh]$

E_h : energía hidráulica en $[Wh]$

η_{mb} : rendimiento motor – bomba a temperatura de referencia $25^\circ C$

El rendimiento del subsistema motor – bomba a una temperatura de referencia viene dada por la expresión siguiente:

$$\eta_{fg} = F_m [1 - \delta(T_m - T_a)] \eta_g \quad (4)$$

Donde:

η_{fg} : rendimiento medio diario del generador en condiciones de operación

F_m : Factor de acoplo medio del generador

δ : Coeficiente de variación de potencia con la temperatura de células fotovoltaicas

T_m : Temperatura media diaria del panel fotovoltaico durante horas de sol

T_a : Temperatura ambiente 25°C

Ya obtenido el valor de la superficie de los paneles solares es posible calcular la potencia de salida pico del generador fotovoltaico que es igual a la siguiente expresión:

$$P_{pg} = \eta_g \times A \times G \quad [W] \quad (5)$$

Donde:

P_p : potencia de salida del generador fotovoltaico está en watts [W]

η_g : rendimiento del generador a temperatura de referencia 25°C

A : área activa de los módulos fotovoltaicos está en [m²]

G : irradiancia solar global incidente [1000 W/m²]

Para que el cálculo de la potencia pico del generador sea más cercana a la real es necesario que se tomen en cuenta todas las eficiencias del sistema como del motor – bomba, el del mismo generador fotovoltaico y algunos coeficientes de acoplo y variación de potencia, es decir reemplazando las ecuaciones 2, 3 y 4 en la ecuación 5; dando lugar a la expresión siguiente:

$$P_p = \frac{E_h}{\eta_{mb} I} \times \frac{G}{F_m [1 - \delta(T_m - T_a)]} \quad [W] \quad (6)$$

Donde:

P_p : potencia pico del generador fotovoltaico en [W]

E_h : energía hidráulica en [Wh]

η_{mb} : rendimiento motor – bomba a temperatura de referencia 25°C

I : irradiación [kWh/m^2]

G : irradiancia solar global incidente [$1 kW/m^2$]

F_m : Factor de acoplo medio del generador

δ : Coeficiente de variación de potencia con la temperatura de células fotovoltaicas

T_m : Temperatura media diaria del panel fotovoltaico durante horas de sol

T_a : Temperatura ambiente $25^\circ C$

Una vez obtenida la potencia pico del generador fotovoltaico, es posible realizar una adecuada selección de la cantidad de paneles que abastecerán de energía al sistema de bombeo, mediante la expresión mostrada a continuación:

$$N = \frac{E_e}{P_p h} \quad (7)$$

Donde:

N : número de módulos fotovoltaicos del sistema de bombeo solar

E_e : energía eléctrica en [Wh]

P_p : potencia pico del generador fotovoltaico en [W]

h : horas [h]

A demás se puede conocer o estimar la temperatura media de operación a la que trabajarán las células fotovoltaicas del panel, conociendo la temperatura ambiente del sector donde se implementará el sistema, la irradiancia media global incidente y la temperatura de operación nominal con la siguiente expresión:

$$T_c = T_a + G \frac{TONC - 20}{800} \quad [^\circ C] \quad (8)$$

Donde:

T_c : temperatura media de operación células fotovoltaicas en [°C]

T_a : temperatura ambiente del sector en [°C]

G : irradiancia solar global incidente [$1000 \text{ W}/\text{m}^2$]

T_{ONC} : temperatura de operación nominal del panel fotovoltaico en [°C]

Una vez se conozca y seleccione un motor adecuado para el sistema de bombeo fotovoltaico, se puede calcular el número de módulos en serie y en paralelo y realizar una correcta configuración del panel o paneles fotovoltaicos, para esto se tiene expresiones mostradas a continuación:

$$N^{\circ}_{\text{mód}_\text{serie}} = \frac{V_{\text{nominal_motor}}}{V_{\text{nominal_módulos}}} \quad (9)$$

$$N^{\circ}_{\text{mód}_\text{paralelo}} = \frac{P_{pg}}{(N^{\circ}_{\text{mód}_\text{serie}} \times P_{\text{pico de un mód}})} \quad (10)$$

Donde:

$N^{\circ}_{\text{mód}_\text{serie}}$: número de celdas solares en serie

$V_{\text{nominal_motor}}$: voltaje nominal del motor en voltios [V]

$V_{\text{nominal_módulos}}$: voltaje nominal de una célula fotovoltaica en voltios [V]

$N^{\circ}_{\text{mód}_\text{paralelo}}$: número de celdas solares en paralelo

P_{pg} : potencia pico del panel solar en watts [W]

$P_{\text{pico de un mód}}$: potencia pico de una celda fotovoltaica en watts [W]

2.6. Características de bombas hidráulicas

2.6.1. Definición bomba hidráulica

Una bomba hidráulica (ver figura 14) es una máquina transformadora de energía, absorbe energía de un tipo (eléctrica) y la restablece en energía de otro tipo (mecánica). Por otro lado las bombas son máquinas que se clasifican en: máquinas de fluido, máquinas herramientas y máquinas eléctricas, una bomba hidráulica se encuentra en el grupo de las máquinas de fluido; estas son máquinas donde el fluido es el que suministra la energía a la máquina (como ejemplo, el agua que se suministra a una turbina con presión que viene de la energía geodésica del embalse y a su vez la turbina la convierte en energía mecánica) o también el fluido es el que recepta la energía proveniente de la máquina. (Mataix, 2004)



Figura 14. Bombas hidráulicas
Fuente: (De los Santos López, 2018)

Entonces decimos que una bomba hidráulica es una máquina que tiene como función la de impulsar un fluido en una determinada dirección mediante la transformación de energía eléctrica en energía mecánica. El tipo de fluido impulsado es incompresible y puede ser líquido como el agua o una mezcla de líquidos y sólidos. La bomba al incrementar la energía del fluido, aumenta la presión, la velocidad y por efecto de esto puede ser impulsado hacia un nivel más alto de donde se encontraba. En términos generales una bomba se utiliza para incrementar la presión de un líquido añadiendo

energía al sistema hidráulico, para mover el fluido de una zona de menor presión o altitud a otra de mayor presión o altitud.

2.6.2. Clasificación de las bombas hidráulicas

A las bombas hidráulicas se las puede clasificar en dos grupos a continuación en la figura 15 se muestra dicha clasificación:

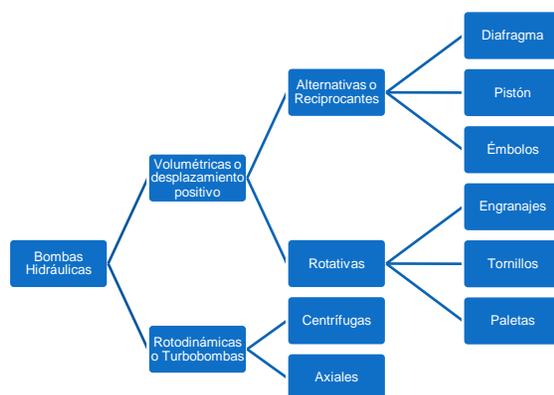


Figura 15. Clasificación de bombas hidráulicas

Principalmente en la construcción de bombas solares las más ocupadas son las bombas de desplazamiento positivo y las bombas centrífugas que se encuentran en el grupo de las bombas rotodinámicas, se las definirá a continuación cada una:

- **Bombas de desplazamiento positivo:** También llamadas volumétricas (ver figura 16), son aquellas donde el fluido (agua) se traslada o desplaza de un compartimiento sellado a otro. Su funcionamiento se centra en el principio que lleva su mismo nombre, el principio de desplazamiento positivo la cual dice que una máquina puede funcionar como un motor o como bomba, es decir, puede brindar potencia hidráulica (Qp) absorbiendo potencia mecánica (FV , bomba) o

como también puede absorber otro tipo de energía y restituirla en potencia mecánica (motor). (Viejo & Álvarez, 2012)



Figura 16. Bomba desplazamiento positivo
Fuente: (Abella & Romero, 2017)

- **Bombas rotodinámicas:** Se llaman así porque su movimiento es rotativo, son bombas que cuentan con algún tipo de impulsor o rotor que gira y se encuentra dentro de una carcasa para así poder mover el agua (ver figura 17). El rotor posee aletas o cuchillas que atrapan el agua para poder acelerar el fluido para que abandone la bomba a más velocidad de la que entró. Su funcionamiento se basa en la ecuación de Euler, es la ecuación fundamental que expresa en las máquinas hidráulicas y turbomáquinas el intercambio de energía en el rodete. Este segundo grupo de bombas se las puede clasificar en dos subgrupos como son las bombas centrífugas que se definirá a continuación por su alta relevancia en la fabricación de bombas solares y las axiales: (Mataix, 2004)

Entonces se puede decir que las bombas centrífugas están conformadas por un rodete o impulsor que se encuentra inmerso en una carcasa o también llamado

voluta, el fluido aspirado ingresa al centro del rodete, al girar aumenta la presión del fluido es decir lo acelera, entonces se puede decir que la energía cinética acumulada por el fluido es transformada en energía potencial cuando sale de la bomba. En aplicaciones de bombeo en escalas pequeñas y medianas las bombas centrífugas son las más utilizadas, para el almacenamiento de agua en domicilios y edificios, como para regadío a pequeña escala se utilizan bombas pequeñas, esto debido a su bajo costo y simplicidad, pero son muy poco eficientes. Para altas cargas no son muy aconsejables y es preferible utilizar otro tipo de bombas. (Frenkel & Thake, 2010)

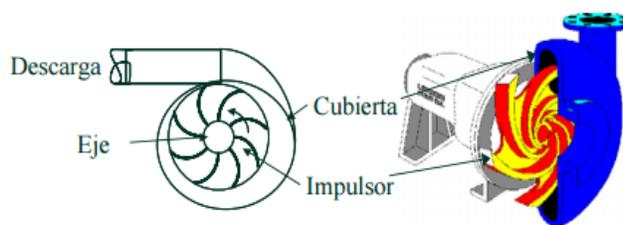


Figura 17. Bomba centrífuga
Fuente: (Abella & Romero, 2017)

2.6.3. Elementos constitutivos bomba hidráulica

Generalmente las principales partes que constituyen a una bomba hidráulica (ver figura 18) son: el rodete o impulsor, la carcasa o voluta que puede incluir un sistema difusor, las bridas de aspiración e impulsión, las empaquetaduras y cierres mecánicos. A continuación, se muestra un diagrama de las partes que constituyen generalmente a una bomba hidráulica y se definen a continuación:

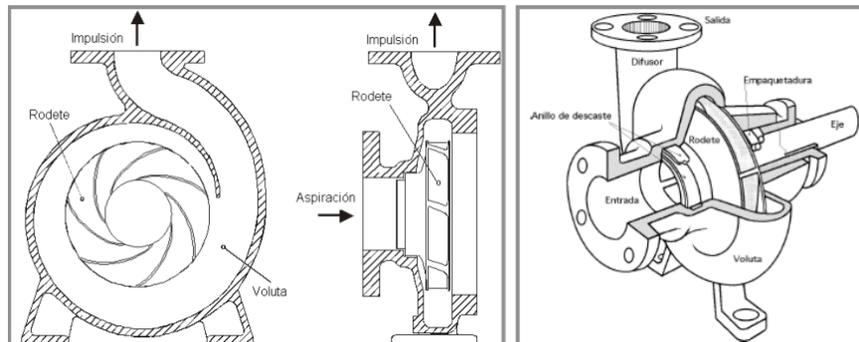


Figura 18. Elementos constitutivos bomba centrífuga

Fuente: (Pérez & Renedo, 2012)

- **Rodete:** También llamado impulsor es el elemento que gira incorporado al eje de la bomba y consta de un determinado número de álabes que comunican energía en forma cinética y de presión al fluido.
- **La voluta:** O conocida como carcasa es el espacio físico donde se encuentra dentro principalmente el rodete y es el elemento que da dirección al fluido convirtiendo la energía cinética en presión, en algunos casos incluye un sistema difusor.
- **Corona directriz:** Es también llamada corona de álabes fijos, este elemento es el que se encarga de recoger el fluido del rodete y de transformar la energía dinámica del fluido que tiene en ese momento aportado por el rodete en energía de presión. No todas las bombas poseen corona directriz ya que aumenta su precio en la construcción, aunque este elemento aporta mayor eficiente a una bomba.
- **Caja espiral:** Transforma en energía de presión la energía dinámica y también recoge de la salida del rodete el fluido procurando perder mínimamente la energía que posee en ese momento.

- **Tubo difusor:** Es conocido también como cono difusor es la tercera etapa donde se realiza la transformación a energía de presión de la energía dinámica. (Mataix, 2004)

2.6.4. Altura útil o efectiva de una bomba hidráulica

La altura útil de una bomba es la diferencia entre la altura teórica a la que el impulsor o rodete puede impartir al fluido menos las pérdidas existentes dentro de la bomba o pérdidas hidráulicas internas expresada en altura. Otra definición de altura útil es la resta entre las alturas totales en la entrada y la salida de una bomba, esta diferencia es lo que aporta la bomba al fluido es decir el incremento de altura útil. A continuación, se muestra un esquema en la figura 19 como referencia del cálculo. (Mataix, 2004)

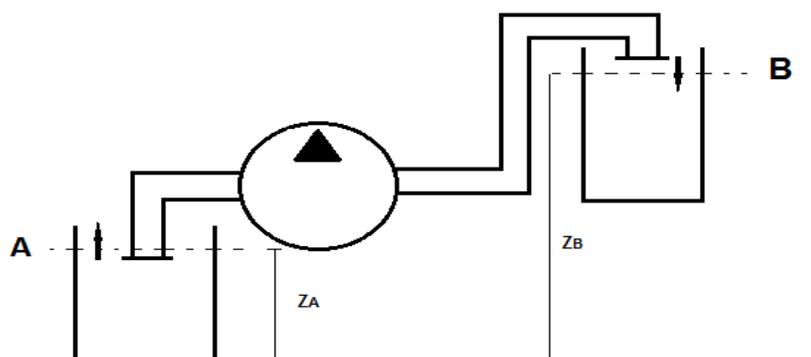


Figura 19. Alturas en un sistema de bombeo

La altura útil o efectiva de una bomba se la puede calcular de tres formas diferentes, la primera forma se la calcula cuando se conoce los valores reales de altura estática o geométrica y pérdidas hidráulicas o pérdidas dinámicas en metros existentes en el sistema de bombeo, la segunda forma se calcula cuando se posee medidores de presión en la entrada y salida de la bomba, y la tercera forma para calcular la altura efectiva de

una bomba se la realiza cuando se conocen los datos de la instalación hidráulica. A continuación, se muestra la expresión para calcular la altura útil de una bomba mediante la primera forma:

$$h = h_g + h_d \quad [m] \quad (11)$$

Donde:

h : altura útil de la bomba en metros [m]

h_g : altura estática o geométrica de la bomba en metros [m]

h_d : pérdidas hidráulicas internas de la bomba expresadas en altura [m]

2.6.5. Potencia de una bomba hidráulica

A la potencia se la puede definir como a la rapidez con la que se realiza un determinado trabajo, en el sentido de hidráulica o en mecánica de fluidos se puede variar esta definición y se dice que la potencia no es más que la rapidez con la que una bomba transfiere la energía mecánica hacia un fluido en energía de movimiento. Generalmente se tiene tres tipos de potencia, la potencia de accionamiento, la potencia interna y la potencia útil, a continuación se muestra en la figura 20 estas potencias: (Mataix, 2004)

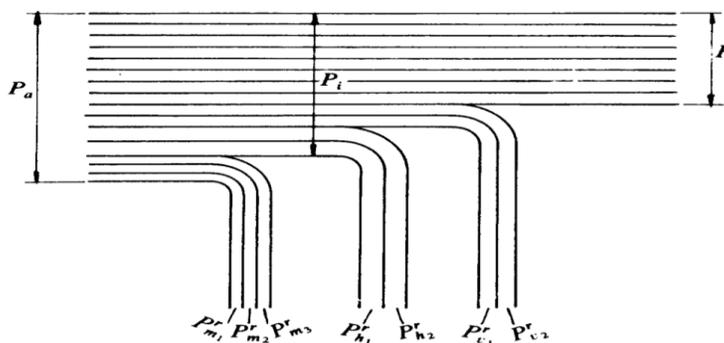


Figura 20. Esquema de potencias en una bomba
Fuente: (Mataix, 2004)

Por otro lado, la potencia útil es la potencia directamente proporcional al caudal útil, a la densidad del fluido bombeado, a la aceleración de la gravedad y a la altura útil y se muestra en la ecuación siguiente:

$$P = Q\rho gh \quad [W] \quad (12)$$

Donde:

P: potencia útil de una bomba en watts [W]

Q: caudal útil de una bomba en $[m^3/s]$

h: altura útil de una bomba en [m]

ρ: densidad del fluido de trabajo en $[kg/m^3]$

g: velocidad de la gravedad en $[m/s^2]$

2.6.6. Rendimiento de una bomba hidráulica

En cualquier sistema sea cual sea, el rendimiento de una máquina es menor a la unidad, esto se debe a que existen pérdidas en todo el proceso, el rendimiento generalmente para una bomba se la define como el cociente entre dos magnitudes; la potencia útil y la potencia consumida por la bomba. Comúnmente se tienen cinco tipos de rendimiento: rendimiento hidráulico cuyo símbolo es (n_h) y su ecuación $n_h = H/H_{int}$, rendimiento volumétrico donde su nomenclatura es (n_v) y expresión es $n_h = Q/Q_t$, el rendimiento interno su símbolo (n_i) y su ecuación $n_i = P/P_i$, el rendimiento mecánico con su nomenclatura (n_m) y expresión $n_m = P_i/P_a$, y finalmente el rendimiento total (n_{tot}), $n_{tot} = P/P_a$ con su símbolo y ecuación respectivamente. (Mataix, 2004)

2.6.7. Selección de la bomba hidráulica solar

Para tener un adecuado funcionamiento del sistema de bombeo fotovoltaico es necesario seleccionar adecuadamente el motor que impulsará la bomba, esto depende de que la potencia eléctrica del motor debe ser capaz de soportar la potencia pico del generador fotovoltaico. Hay situaciones en donde la potencia eléctrica del motor es menor a la del generador fotovoltaico, esto da lugar a menores pérdidas por desacoplo, pero la vida útil del motor disminuirá por estar expuesto a posibles sobrevoltajes. (Abella & Romero, 2017)

Con respecto a la selección de la bomba es necesario que esta cumpla con el requisito de impulsar el caudal pico diario de agua a una altura determinada previamente, esto se observa en los catálogos de fabricantes, que en la actualidad el subsistema motor – bomba viene ya acoplados, facilitando así la selección.

Si se quiere corroborar la selección de la bomba y de una forma más exacta se puede calcular su potencia útil con el respectivo rendimiento y también el caudal pico que brinda la bomba al sistema mediante fórmulas, la ecuación que muestra a la potencia útil de la bomba es directamente proporcional al caudal diario que se necesita bombear, la densidad del fluido bombeado y a la altura a la que se necesita bombear el fluido e inversamente proporcional al rendimiento de esta y se muestra a continuación:

$$P = \frac{gQh}{\eta_b} \quad [W] \quad (13)$$

Donde:

P: potencia hidráulica de una bomba en watts [W]

Q: caudal útil de una bomba en [l/s]

h : altura útil de una bomba en [m]

g : velocidad de la gravedad en $[m/s^2]$

η_b : eficiencia de la bomba

La ecuación del caudal pico que suministra la bomba está asociado con la potencia pico, el rendimiento pico o máximo del sistema, la gravedad y altura. Para poder calcular el caudal pico que puede suministrar una bomba a un sistema se utiliza una expresión, la cual se muestra a continuación:

$$Q_p = \frac{P_p \eta_p}{gh} \quad [l/s] \quad (14)$$

Donde:

Q : caudal pico que puede suministrar una bomba en $[l/s]$

η_p : rendimiento pico del subsistema motor – bomba

P_p : potencia pico del generador fotovoltaico en watts [W]

g : velocidad de la gravedad en $[m/s^2]$

h : altura útil de una bomba en [m]

2.7. Análisis, dimensionado y selección en tuberías

Se denomina tubería como término general al conjunto de todos los tipos de conductos encargados de trasladar el fluido hidráulico entre dos o más componentes, y de los accesorios usados entre los conductores. En la actualidad la mayoría de sistemas hidráulicos usan básicamente tres clases de conducto; tubing de acero (tubería de acero sin costura), tubería de acero y manguera flexible. De los tres elementos el material más barato por el momento es la tubería de acero, además de hacer efectiva una instalación

hidráulica. Con el tiempo se está empezando a utilizar tuberías de plástico para abaratar costos, y en un futuro reemplace a las líneas con tubería de acero, en los primeros sistemas hidráulicos se usaron tuberías de hierro y acero y aún se los utilizan en muchas aplicaciones por su bajo costo. (VYCMEX, 2010)

En un sistema de tuberías es necesario conocer con qué tipo de fluido se estará trabajando por esta razón a un fluido se le puede dividir según su flujo en laminar y turbulento. Lo que diferencia en si un fluido es laminar o turbulento es la energía que posee en el sistema de tubería en que se encuentra es decir la velocidad a la que el fluido está circulando por esta.

- **Flujo laminar:** este tipo de flujo es principalmente incomprensible que se caracteriza por estar totalmente desarrollado (ver figura 21), es decir si la tubería es suficientemente larga con respecto al largo de la tubería en la entrada, además si cada partícula de fluido se mueve uniformemente a una velocidad constante en dirección a la forma tubería, no existe velocidad radial ni aceleración. (Cengel & Cimbala, 2006)

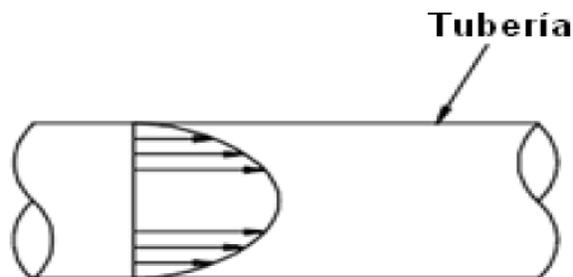


Figura 21. Flujo laminar
Fuente: (Utreras & Berrú, 2009)

- **Flujo turbulento:** en situaciones reales la mayoría de fluidos son turbulentos, un flujo turbulento es algo complejo que en la actualidad sus estudios teóricos no son 100% totales y se basa en experimentos empíricos o semi - empíricos. Un flujo turbulento (ver figura 22) se caracteriza por estar sometido por fluctuaciones, es decir sus partículas tienen movimiento aleatorio con mucha rapidez formando regiones turbulentas denominadas remolinos, de esta manera a diferencia de un flujo laminar el flujo turbulento genera mayor temperaturas por ende fricción. (Cengel & Cimbala, 2006)

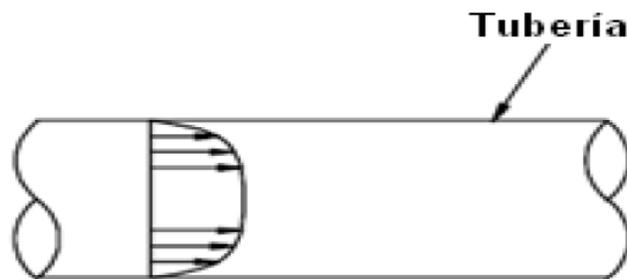


Figura 22. Flujo turbulento
Fuente: (Utreras & Berrú, 2009)

2.7.1. Número de Reynolds

La cantidad de energía de un fluido necesaria para que mantenga la rapidez de flujo en un sistema determinado depende del tipo de flujo que a su vez depende de la velocidad, temperatura de la geometría y rugosidad del medio en que circula. Este régimen de flujo depende principalmente de fuerzas inerciales y fuerzas viscosas del fluido, este es un número adimensional que se analizará en la siguiente expresión: (Cengel & Cimbala, 2006)

$$Re = \frac{v\phi_i\rho}{\mu} \quad (15)$$

Donde:

Re : número de Reynolds número adimensional

v : rapidez del flujo en [m/s]

ϕ_i : diámetro interno de la tubería en [m]

ρ : densidad del fluido en [kg/m³]

μ : viscosidad dinámica del fluido en [kg/m.s]

La velocidad del fluido es un valor el cual se necesita calcular mediante la expresión siguiente:

$$v = \frac{Q}{A} \quad [m/s] \quad (16)$$

Donde:

v : velocidad del fluido en la tubería en [m/s]

Q : caudal del fluido en [m³/s]

A : área de la tubería en [m²]

Sería muy conveniente tener valores precisos de número de Reynolds para cada tipo de fluido, pero en la realidad esto no sucede, entonces se aplica un criterio para establecer si el fluido con el que se trabaja tiene un régimen laminar o un régimen turbulento, el criterio es el siguiente, si el número de Reynolds es menor o igual a 2300 el flujo correspondiente es laminar, y si el valor del número de Reynolds es mayor o igual a 4000 el flujo es turbulento; además si el valor se encuentra entre estos dos límites al flujo se le conoce como flujo de transición. Además con el previo conocimiento y cálculo

del número de Reynolds, el tipo de flujo y la rugosidad relativa de la tubería, se puede determinar el factor de fricción (f) mediante el diagrama de Moody. (Cengel & Cimbala, 2006)

2.7.2. Diagrama de Moody

Es un diagrama donde se muestra el factor de fricción de flujo en curvas ajustadas que depende del número de Reynolds y la rugosidad relativa (ϵ/D) (ver figura 23), esta es la razón que existe entre la altura media de la rugosidad y el diámetro de la tubería. El factor de fricción de flujo es particularmente para flujos turbulentos y de transición, este factor no se puede obtener de forma teórica por que la rugosidad en las tuberías comerciales no son exactas, estas varían (como puede ser la existencia de partículas de polvo que crean turbulencia), pero fue calculado en experimentos a partir de mediciones entre la razón de flujo y la caída de presión en años pasados. (Cengel & Cimbala, 2006)

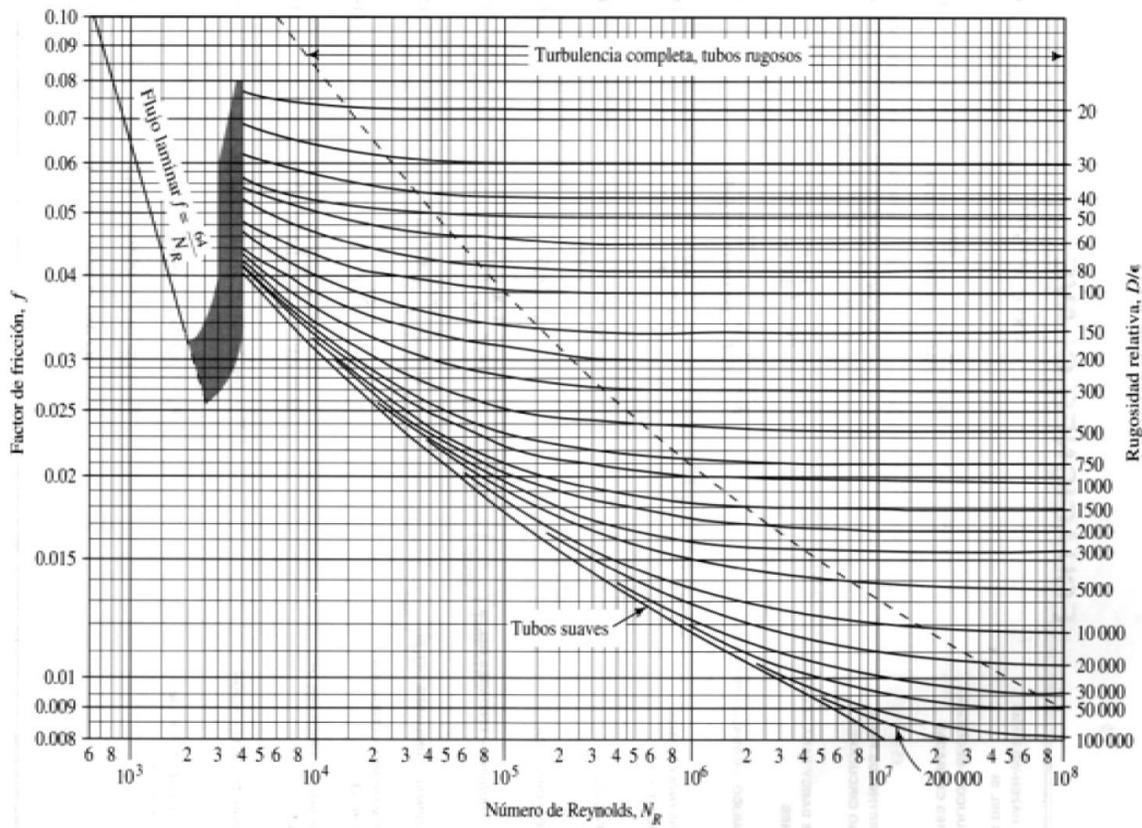


Figura 23. Diagrama de Moody
Fuente: (Utreras & Berrú, 2009)

2.7.3. Pérdidas en tuberías

En un sistema de tuberías existen varios accesorios, ensanchamiento y contracciones a más de las tuberías, las pérdidas aparecen debido a que se generan en estos accesorios y en las tuberías un fenómeno de mezcla y separación de fluido producido por interrupción del suave flujo o de su movimiento normal en el sistema de tuberías; las pérdidas mayores se generan en las tuberías existentes, en cambio se conoce como pérdidas menores a las pérdidas existentes en los accesorios. Todas estas pérdidas se las conoce también como pérdidas de carga expresadas en altura, estas pérdidas se han

evidenciado y se han calculado de forma experimental mediante expresiones dadas en sí por los fabricantes de los accesorios de tuberías. (Cengel & Cimbala, 2006)

Las pérdidas mayores en un sistema de tubería que se da por la fricción existente entre el fluido y la tubería se las conoce también como pérdidas de carga del fluido (h_L), las pérdidas menores se expresan en función del coeficiente de pérdidas, en ocasiones llamado también coeficiente de resistencia (K), por consiguiente tenemos la expresión para la pérdida de carga a continuación: (Cengel & Cimbala, 2006)

$$h_L = f \frac{L v^2}{\phi 2g} \quad (17)$$

Donde:

h_L : pérdida de carga del fluido expresada en [m]

f : factor de fricción adimensional

L : longitud de la tubería en [m]

ϕ : diámetro de la tubería en [m]

v : velocidad del fluido en [m/s]

g : aceleración de la gravedad en [m/s²]

Y para las pérdidas menores la expresión siguiente:

$$h_{L,menor} = K \frac{v^2}{2g} \quad (18)$$

Donde:

$h_{L,menor}$: pérdida menor en [m]

K : coeficiente de pérdida adimensional que depende del tipo de accesorio

v : velocidad del fluido en [m/s]

g : aceleración de la gravedad en $[m/s^2]$

El coeficiente de resistencia o pérdida (K) depende en general de la geometría del accesorio y del tipo de accesorio existente en la tubería y se encuentran tabulados en tablas como la indicada a continuación:

Tabla 4
Coefficiente K para accesorios de tubería

Pérdidas de carga en accesorios		$H_d = K \frac{v^2}{2g}$
Accesorio	Coeficiente K	
Unión de depósito a tubería. Conexión a ras de pared	0,5	
Unión de depósito a tubería. Tubería rasante	1,0	
Unión de depósito a tubería. Conexión abocinada	0,005	
De tubería a depósito	1,0	
Codo 45°	0,35 → 0,45	
Codo 90°	0,50 → 0,75	
Tés	1,50 → 2,00	

Fuente: (Abella & Romero, 2017)

Precedentemente con todo lo expuesto, una vez obtenidos todos los coeficientes de pérdidas, la pérdida de carga total se da por una expresión mostrada a continuación:

$$\begin{aligned}
 h_{L,total} &= h_{L,mayor} + h_{L,menor} \\
 &= \sum_{n=1}^i f \frac{L v^2}{\phi 2g} + \sum_{n=1}^i K \frac{v^2}{2g}
 \end{aligned} \tag{19}$$

Donde:

$h_{L,total}$: pérdida de carga total expresadas en [m]

$h_{L,mayor}$: pérdida de carga mayor expresadas en [m]

$h_{L,menor}$: pérdida de carga menor expresada en [m]

$\sum_{n=1}^i f \frac{L v^2}{\phi 2g}$: sumatorio pérdida de carga mayor donde i representa cada tramo

de tubería

$$\sum_{n=1}^i K \frac{v^2}{2g} : \text{sumatorio pérdida de carga menor donde } i \text{ representa cada tramo}$$

de tubería

Si en cada tramo de tubería el diámetro es constante la expresión anterior de la pérdida de carga total se reduce a la siguiente:

$$h_{L,total} = \left(f \frac{L}{\phi} + \sum K \right) \frac{v^2}{2g} \quad [m] \quad (20)$$

Donde:

$h_{L,total}$: pérdida de carga total del fluido expresada en [m]

f : factor de fricción adimensional

L : longitud de la tubería en [m]

ϕ : diámetro de la tubería en [m]

$\sum K$: sumatorio de cada coeficiente de pérdida adimensional

v : velocidad del fluido en [m/s]

g : aceleración de la gravedad en [m/s²]

2.7.4. Tamaños de la tubería

Generalmente los tamaños de la tubería y de sus conexiones se los clasifica por un tamaño nominal y por el espesor que tiene la pared. En sus principios un determinado tamaño de tubería, poseía únicamente un espesor de pared el cual era dado por el diámetro interior real de dicha tubería, conforme pasó el tiempo la tubería se fabricó con tres medidas de espesor: estándar, extrapesado y doble extrapesado como se muestra

en la tabla 5. A pesar de ello el diámetro externo no cambió de medidas, pero si el diámetro interior para aumentar el espesor de la pared, por esta razón el tamaño nominal de la tubería indica únicamente el tamaño de la rosca para la conexión. (VYCMEX, 2010)

Tabla 5
Diámetros tubería de PVC

Diámetro nominal (mm)		Diámetro interior	Espesor nominal	Presión de trabajo
Unión U/Z	Unión E/C	mm	mm	MPa
	20	17,8	1,1	1,25
		16,8	1,6	2,00
	25	22,8	1,1	1,00
		21,8	1,6	1,60
	32	29,8	1,1	0,80
		28,8	1,6	1,25
	40	37,8	1,1	0,63
		36,8	1,6	1,00
		36,0	2,0	1,25
50		47,4	1,3	0,63
		46,8	1,6	0,80
		46,0	2,0	1,00
		45,0	2,5	1,25
63		59,8	1,6	0,63
		58,8	2,1	0,80
		58,0	2,5	1,00
		56,8	3,1	1,25
75		72,0	1,5	0,5
		71,2	1,9	0,63
		70,2	2,4	0,80
		69,0	3,0	1,00
90		67,6	3,7	1,25
		86,4	1,8	0,50
		85,4	2,3	0,62
		84,2	2,9	0,80
		82,8	3,6	1,00
		81,2	4,4	1,25

Fuente: (Plastigama, 2018)

2.7.5. Cédula de la tubería

El término cédula es un número específico que expresa el grosor de la pared de una tubería. Estos números de cédula son estandarizados por el Instituto Nacional Americano

de Estándares (ANSI por sus siglas en inglés) y vienen de 10 a 160 y cada número tiene diez juegos de gruesos de pared como se muestra en la tabla 6. (VYCMEX, 2010)

2.7.6. Sellos o uniones para una tubería

En la unión de tuberías se utilizan conexiones roscadas, conexiones soldadas, conexiones bridadas y conexiones de enchufe. Comúnmente para sellar una tubería hidráulica en las uniones se utiliza el tipo de conexión roscada ya que tiene un bajo precio y es de fácil ejecución, el roscado es de tipo cónico auto sellante. Las uniones son selladas con un ajuste intermedio entre la rosca macho y hembra. En una tubería hidráulica esta es una de sus mayores desventajas ya que cuando una unión se rompe se debe apretar la tubería más adelante para poder resellarla, en ocasiones es necesario cambiar parcial o totalmente la tubería, con el uso de cinta de teflón u otros componentes para resellar las uniones en la tubería hidráulica se ha resuelto hasta cierto punto este inconveniente. (VYCMEX, 2010)

2.7.7. Conexiones para una tubería

Ya que el tubo no se dobla y al tener rosca macho, con el fin de realizar uniones y cambiar la dirección y sentido en que una tubería se encuentra se utilizan distintos tipos de conexiones. Estos accesorios en su mayoría tienen rosca hembra para poder acoplarse con la tubería, pero algunas conexiones poseen rosca macho para poder unirse con otros accesorios o con orificios de elementos hidráulicos de la instalación. Las conexiones o accesorios de una tubería pueden ser tapón macho, una tee, un codo de 90°, una tuerca, acoplamientos (reto, reductor) que se muestran a continuación en la figura 24. (VYCMEX, 2010)

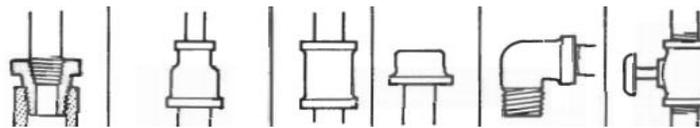


Figura 24. Conexiones tubería

Fuente: (VYCMEX, 2010)

- **Tapón macho:** Es usado para cerrar una abertura u orificio en una conexión hidráulica que no se usa.
- **Una tee:** Es utilizada para poder realizar o tener conexiones paralelas en una misma tubería.
- **Un codo de 90°:** O también se le conoce con el nombre de “ele” se usa para poder cambiar la dirección de una tubería, existen también codos de 60° y 45°.
- **Una tuerca:** Este elemento tiene dos lados roscados y además de un nudo externo donde permite aflojar o apretar una unión de tubería sin necesidad de girarla.
- **Acoplamientos:** Elemento que permite conectar dos secciones de tubería puede ser del mismo diámetro (acoplamiento recto) o de diferente diámetro (acoplamiento reductor). (VYCMEX, 2010)

2.7.8. Dimensionado de tuberías

El diámetro de las tuberías utilizadas tiene que ser calculadas tomándose en cuenta las pérdidas por carga o altura dinámica, especificadas cuando se obtiene la energía hidráulica necesaria y con la longitud real de la tubería a esto más "longitud equivalente" de todos los accesorios hidráulicos de la instalación. Para las pérdidas que se pueden admitir y una longitud total (L, incluidos los accesorios del sistema o circuito hidráulico) el diámetro de las tuberías se puede aproximar o estimar mediante las tablas o gráficos que

muestren las pérdidas de carga en función del caudal para cada diámetro de la tubería, tomando siempre en cuenta el tipo de material con el que esté construido cada elemento. Se recomienda que el diámetro de la tubería y accesorios sea superior a un valor tal que las pérdidas hidráulicas no superen el 10% de la altura hidráulica de bombeo, preferentemente un 2%. (Abella & Romero, 2017)

2.8. Sistemas de sensado, medición, regulación y control

2.8.1. Medidores de flujo

Son instrumentos cuya función es la de sensar la cantidad de fluido que existe o pasa en un determinado tiempo. Para poder determinar el caudal es necesario conocer de antemano las condiciones del sistema si este es de tubería cerrada, semicerrado o abierto; si el fluido a medir es líquido, gas o vapor; si el fluido es limpio o sucio, erosivo o corrosivo, seco o húmedo. Como la mayoría de sistemas industriales son de tubería cerrada los métodos utilizados son: el método de presión diferencial y el método de desplazamiento positivo y a su vez estos se subdividen en diferentes tipos de métodos de medición como se muestra en la figura 25. (Cárdenas, 2017)

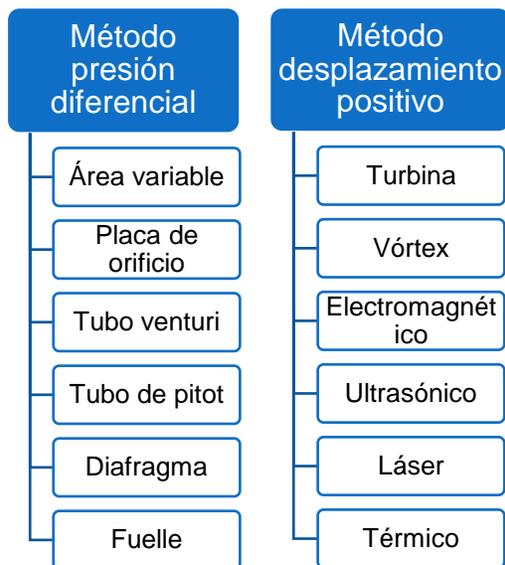


Figura 25. Métodos de medición de flujo

- **Medidores diferenciales de presión:** son los más usados a nivel de procesos industriales alrededor del 66%. El funcionamiento de los medidores de flujo se basa en el principio de que el cuadrado de la velocidad de flujo es proporcional a la disminución de la presión en el medidor. La mayoría de medidores poseen dos elementos uno primario (ejemplo placa de orificio), el cual provoca un cambio en la energía cinética para crear presión diferencial en la tubería, y uno secundario (ejemplo tubo de Bourdon), que capta y registra la presión diferencial y transmite esa señal para realizar la lectura correspondiente. Existen diferentes tipos de medidores de caudal que utilizan el método diferencial de presión y estos son: los de área variable, placa de orificio, tubo venturi, tubo de pitot. (Cárdenas, 2017)
- **Medidores de desplazamiento positivo:** Son medidores de gran exactitud cuando el flujo es estable, el principio de funcionamiento es el de separar la corriente de flujo en pequeños espacios o segmentos volumétricos individuales, es

decir, integran los volúmenes por separado del fluido. Cada fragmento de fluido recorre desde la entrada hasta la salida y se aísla mecánicamente dentro del elemento medidor, las partes mecánicas aprovechan la energía del fluido, llenando y vaciando alternadamente los compartimientos del medidor. La medición del caudal en un período de tiempo es el producto del volumen de la muestra por el número de muestras. Los medidores de desplazamiento positivo se subdividen en medidores de: turbina, vortex, electromagnético, ultrasónico, laser, térmico y coriolis. (Cárdenas, 2017)

2.8.2. Sensores de nivel de líquidos

Son instrumentos que se encargan de registrar a que nivel se encuentra el líquido, habiendo diferentes formas de hacerlo ya sea midiendo directamente la altura del líquido con respecto a una línea de referencia, como por el desplazamiento producido por un flotador sobre el mismo líquido en un tanque, o por métodos indirectos como la medición de la presión hidrostática existente o bien beneficiarse de las características eléctricas del mismo líquido. A continuación, se muestra su clasificación en la figura 26. (CubaEduca, 2010)

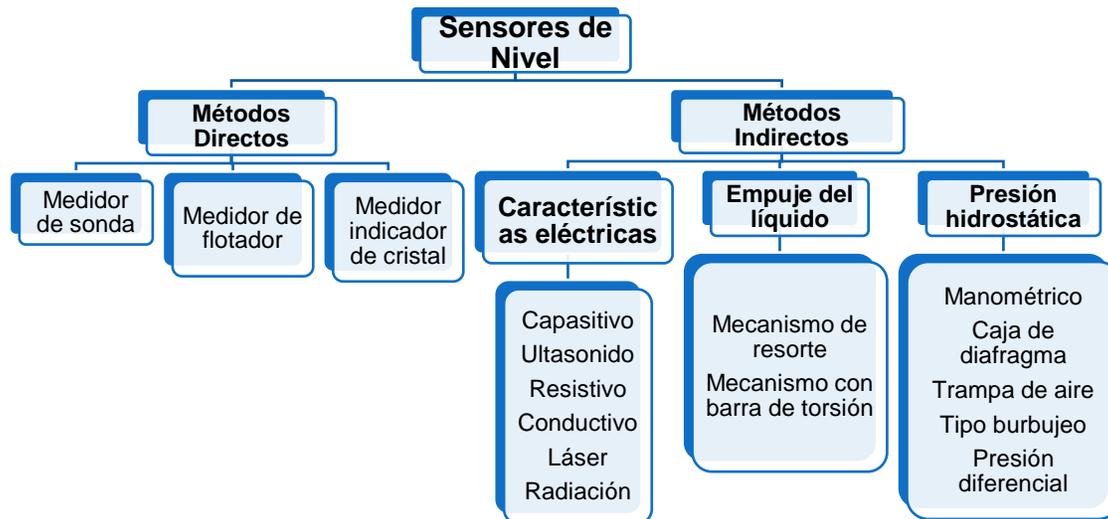


Figura 26. Medidores de nivel

2.8.3. Reguladores o controladores de presión

Existen válvulas que controlan la presión de un fluido dentro de un sistema su función es limitar y mantener constante la presión máxima en ciertas partes del circuito, el funcionamiento se basa en el equilibrio de la presión y la fuerza de un resorte. La mayor parte de este tipo de válvulas tiene una gran cantidad de posiciones que están entre las posiciones completamente cerradas o completamente abiertas que dependen de la diferencia de presión y el porcentaje de flujo que exista. (VYCMEX, 2010)

Un regulador o controlador de presión es prácticamente una válvula que tiene recorrido graduable y que se encuentra acoplado a un diafragma (ver Figura 27), el diafragma se nivela con la presión de entrada o salida y por una fuerza aplicada del lado opuesto. Esta fuerza puede ser otorgada simplemente por un resorte, un peso o por algún otro elemento que se denomina piloto, elemento regulador o controlador de presión de tamaño más pequeño. (Rendón, 2006)

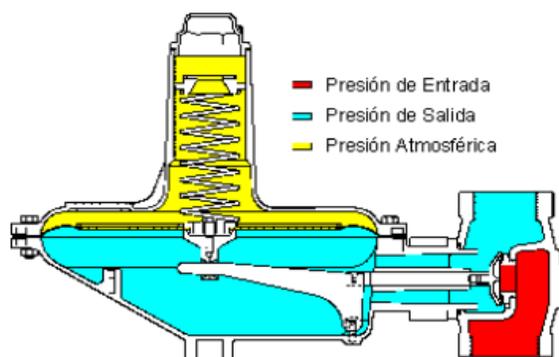


Figura 27. Regulador de presión

Fuente: (Rendón, 2006)

En general un regulador de presión tiene como elementos constitutivos: un elemento restrictor que es el orificio de la válvula, un elemento sensor en este caso el diafragma y conductos de la válvula reguladora y el elemento de carga que puede ser un resorte, un peso o el elemento piloto. (Rendón, 2006)

Se pueden distinguir dos grandes grupos de reguladores: los reguladores auto-operados y los reguladores pilotados o accionados por fuentes externas.

- **Reguladores auto-operados:** Son reguladores que poseen como elemento graduable un resorte para la presión deseada, a más de poseer pocas partes móviles hace a este tipo de regulador sea de fácil mantenimiento y operación. (Rendón, 2006)
- **Reguladores pilotados:** Están formados por un elemento regulador pequeño comúnmente conocido como piloto, multiplicador y amplificador que se lo utiliza para controlar al regulador principal ya que posee gran sensibilidad para detectar las más mínimas variaciones de presión aguas abajo y transferir esos cambios hacia el regulador. (Rendón, 2006)

2.9. Hipótesis

Mediante el dimensionamiento e implementación de un módulo didáctico de bombeo solar fotovoltaico se podría cuantificar el volumen del fluido mediante el aprovechamiento de la radiación solar del sistema en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga.

2.10. Cuadro de operacionalización de variables

Tabla 6

Operacionalización de variable independiente

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DIMENSIONES	INDICADORES
Dimensionado e implementación de un módulo didáctico de bombeo solar fotovoltaico	Un módulo didáctico es una estructura conformada por secciones o unidades de pruebas, con los que el alumno pueda adquirir y procesar datos de las mediciones obtenidas como es la cantidad de fluido almacenado	Selección bomba solar	Potencia bomba
			Altura de bombeo
			Volumen diario de agua
		Dimensionamiento y selección panel solar	Volumen de agua diario
		Selección componentes hidráulicos	Altura estática
			Altura dinámica
			Perdidas hidráulicas
		Selección instrumentación del sistema de bombeo FV	Sensor de nivel de agua
			Medidor de radiación
			Regulador manual de presión
Medidor de volumen			
		Medidor de presión	

Tabla 7
Operacionalización de variable dependiente

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DIMENSIONES	INDICADORES
Análisis cuantitativo del volumen de fluido impulsado	El análisis cuantitativo del volumen de fluido impulsado permite establecer la cantidad de volumen de agua que se podrá bombear hacia una altura en un tiempo determinado	Cantidad de fluido impulsado VS radiación solar	Volumen de agua en m^3 o litros
			Radiación solar promedio en W/m^2
		Cantidad de fluido impulsado VS altura	Volumen de agua en m^3 o litros
			Altura total en m

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1 Antecedentes investigativos

Según el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable del Ecuador (MEER) es necesario un cambio radical en las políticas del sector eléctrico para poder tomar nuevamente un papel protagónico del Estado en la oferta energética del país, estas políticas tienen como lineamientos: el incremento en la cobertura del servicio eléctrico en los sectores rurales, el aumento de participación de la energía renovable. (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable del Ecuador, 2018)

Según el Censo de Población y Vivienda que se lo realizó en el año 2010 por parte del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, con relación a la energía eléctrica fue de una 94,77% en la zona urbana, y un 89,03% en la zona rural. En el área rural se aprecia un menor porcentaje en la cantidad de viviendas con servicio eléctrico especialmente en la Amazonía, y esto se debe a que no se puede extender la red eléctrica, ya sea porque se han ido agotando los elementos necesarios por su deterioro o por razones de carácter económico, impacto ambiental y respeto a etnias locales. Por otra parte, instalaciones de sistemas energía renovable en el sector rural no han podido ser aprovechados eficientemente por la población beneficiaria, ya que no hubo una capacitación y sensibilización adecuada. (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable del Ecuador, 2018)

El Ministerio de Electricidad y Energía Renovable del Ecuador (MEER), promueve de manera adecuada la gestión de proyectos que tengan como función el de dar energía eléctrica aprovechando energías no convencionales a zonas rurales. En la actualidad existen proyectos con Organizaciones No Gubernamentales que se muestran en la figura 28 a continuación:

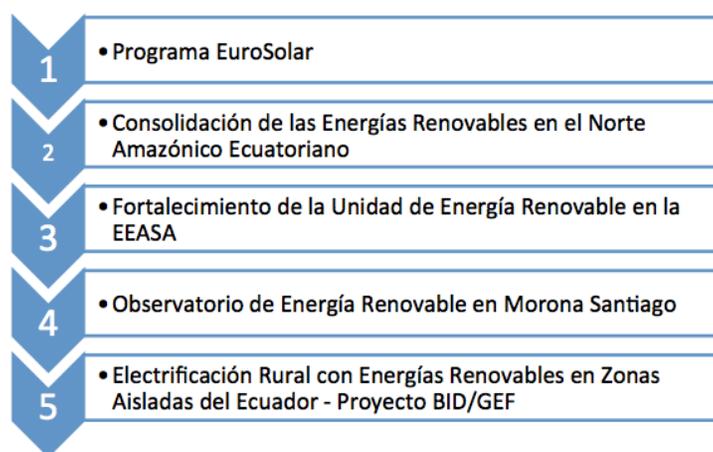


Figura 28. Proyectos de Electrificación Rural no Gubernamentales

Fuente: (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable del Ecuador, 2018)

En la actualidad existen fabricantes de módulos de bombeo solares fotovoltaicos con caudal y altura preestablecidos, estos fabricantes suministran kits para bombeo solar con materiales de alta calidad con una vida útil de por lo menos 30 años; estos recomiendan utilizar paneles solares con materiales de alta calidad ya que estos paneles estarán expuestos de manera directa al medio ambiente, estos kits están pensados para poder utilizarlos en bombeo de agua potable para beber o usar en criaderos o riegos de

superficies pequeñas; además son ideales para la extracción de agua de pozo con alturas variables dependiendo del sector en donde se implementará el sistema.

Las empresas dedicadas a la fabricación de bombas solares pueden construirlas tanto que funcionen en la superficie como también que puedan funcionar sumergidas en el fluido de trabajo; esto dependerá de cada marca, así como también la distribución y suministro de accesorios para sistemas de bombeo solar fotovoltaico y módulos fotovoltaicos, a estos productos se los puede dar varios usos en aplicaciones como:

- Agua potable
- Riego
- Uso recreativo responsable
- Captación solar

3.2 Modalidad de la investigación

3.2.1 Bibliográfica

A lo largo del avance del actual proyecto de investigación se dará el correspondiente uso de fuentes bibliográficas que permitan obtener la mayor cantidad de información científica y veraz en el área de las energías renovables y sistemas de bombeo solar fotovoltaico, se analizará y clasificará la información para ayudar así a contribuir en la investigación de este proyecto.

3.2.2 De campo

La investigación de campo del actual proyecto se desarrollará en el laboratorio de Energías Renovables que se encuentra en la terraza de uno de los bloques de la

Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE” extensión Latacunga, en este sitio es donde podemos obtener energía solar en forma de radiación, y así poder realizar el análisis cuantitativo del fluido impulsado por la bomba solar en las horas de sol pico.

3.2.3 Experimental

La investigación experimental se la realizará mediante un proceso sistemático de mediciones de las variables para obtener los datos necesarios que el módulo didáctico de bombeo solar fotovoltaico ofrezca como es la radiación brindada por el sol en un período de tiempo, la altura simulada y preestablecida, con lo cual se podrá analizar la cantidad de agua impulsada por la bomba solar teniendo en cuenta los dos parámetros mencionados anteriormente.

3.3 Tipos de investigación

3.3.1. Investigación aplicada

Por medio del actual proyecto de investigación se aspira poder ampliar y mejorar el proceso de aprendizaje de los alumnos de la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE” extensión Latacunga en el ámbito del uso e importancia de las energías renovables en la actualidad, mediante la incorporación de un módulo didáctico de bombeo solar fotovoltaico el cual permite analizar variables; como es la cantidad de agua impulsada por una bomba solar que para su funcionamiento depende de la cantidad de energía solar captada por los paneles solares del sistema de bombeo solar fotovoltaico

además de la altura a la que se deberá impulsar el agua, esta última simulada mediante una válvula manual de presión.

3.3.2. Investigación correlacional

Se realizará un estudio exhaustivo sobre el adecuado funcionamiento del sistema de bombeo solar fotovoltaico, esto es un estudio profundo sobre las características con las que funciona el sistema como la radiación solar en el sector de implementación, y el funcionamiento de la bomba solar que es el dispositivo que brindará el caudal de agua, volumen que dependerá de factores como la cantidad de energía otorgada por el generador fotovoltaico y la altura a la cual deberá impulsar el fluido, además del comportamiento del fluido en función de la eficiencia de la bomba solar, la cual funciona con energía de corriente continua, dicha energía es transformada por los paneles solares que captan la radiación solar. Esto en beneficio de los alumnos de la carrera de Ingeniería Electromecánica los cuales podrán mejorar el aprendizaje experimentando y realizando pruebas en el módulo didáctico.

3.4. Niveles de la investigación

3.4.1. Exploratoria

En el laboratorio de Energías Renovables de la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE” extensión Latacunga no se dispone de un módulo didáctico donde se pueda realizar prácticas en sistemas de bombeo solar fotovoltaico, y así poder conocer el

funcionamiento adecuado de estos, que componentes intervienen en su funcionamiento y que variables se pueden analizar a través de este.

3.4.2. Descriptiva

Por medio de los ensayos se recolectará datos y características de funcionamiento importantes en un sistema de bombeo de agua activado por energía solar fotovoltaica, y así poder establecer el rendimiento del sistema en función de su altura y la cantidad de radiación solar diaria que se disponga en el sector de implementación del módulo didáctico de bombeo solar fotovoltaico.

3.5. Población y muestra

En el presente proyecto de investigación la población no es considerada ya que la investigación se encuentra orientada al dimensionamiento e implementación de un módulo didáctico en la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE” extensión Latacunga además de analizar los resultados dados por el módulo didáctico en el laboratorio de Energías Renovables ubicado en la terraza del establecimiento. Y el muestreo que en este caso dependerá de que tan grande podrá ser el módulo didáctico, entonces ahí se podrá decir la cantidad de agua que el módulo tendrá que impulsar.

3.6. Técnicas de recolección de datos

Para un dimensionamiento adecuado del módulo didáctico de bombeo solar fotovoltaico se deberá obtener todos los datos, para esto se requiere conocer la cantidad de agua que se necesitará bombear como también a la altura a la que se deberá impulsar

el volumen de agua, también se deberá tomar muy en cuenta la radiación solar promedio en el lugar de implementación del módulo didáctico, que mediante ayuda de herramientas como son el medidor de volumen y radiación se agilizará el proceso de obtención de este parámetro, ya que estas herramientas muestran la radiación solar promedio en regiones establecidas, además una vez el módulo esté dimensionado e implementado, para lograr un adecuado análisis cuantitativo del fluido en este caso agua, se deberá realizar un proceso de obtención de datos minuciosos con técnicas de observación y experimentación, a continuación se detalla la información necesaria en la siguiente tabla.

Tabla 8
Recolección de información

PREGUNTAS	EXPLICACIÓN
1. ¿Para qué?	Para que la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga disponga de un módulo didáctico donde los estudiantes puedan realizar prácticas de laboratorio sobre sistemas de bombeo solar fotovoltaico
2. ¿De qué personas u objetos?	En el laboratorio de Energías Renovables de la Universidad
3. ¿Sobre qué aspecto?	Sobre el estudio de sistemas de bombeo de agua mediante el uso de energía solar fotovoltaica
4. ¿Quién? ¿Quiénes?	El presente autor
5. ¿Cuándo?	En el presente año 2019
6. ¿Dónde?	Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga
7. ¿Cuántas veces?	Una vez
8. ¿Qué modalidad de investigación?	Bibliográfica, experimental
9. ¿Con qué?	Libros, papers, documentos webs y catálogos
10. ¿En qué situación?	En condiciones de normales de investigación y pruebas

3.6.1. Instrumentos

A medida que se vaya realizando el proyecto de investigación se necesitarán utilizar algunos instrumentos los cuales se mencionan en la siguiente tabla:

Tabla 9

Instrumentos utilizados en el desarrollo del proyecto

EQUIPOS/SOFTWARE	CANTIDAD	DESCRIPCIÓN
Libros físicos, virtuales, papers científicos, tesis, artículos	Varios	Información física u electrónica indispensable sobre conocimiento en el diseño de sistemas de bombeo solar fotovoltaico.
Computador	1	Dispositivo electrónico donde se registrará toda información obtenida en la investigación, además de variables indispensables para el dimensionado.
Software Climático	Varios	Instrumento virtual donde se analizará y consultará radiación solar existente en el sector.

3.6.2. Validez y confiabilidad

Para que el dimensionado del módulo didáctico de bombeo solar fotovoltaico sea el más adecuado, y para que una vez implementado el mismo se puedan realizar pruebas valederas, toda información obtenida con anterioridad deberá contar con ciertos criterios mencionados a continuación:

- Datos obtenidos con revisión crítica, esto quiere decir, que se separará los datos erróneos, incompletos de los datos valederos, completos.
- Varias iteraciones en la recolección de datos, para así disminuir el error entre mediciones o pruebas.

- Tabular los datos o variables obtenidos para un mejor análisis tanto individual como en conjunto.
- Adecuado manejo de los datos con la utilización de gráficas, diagramas, etc., donde se asociarán o compararán datos.

3.7. Técnicas de análisis de datos

En el análisis de la información existen procedimientos con criterios ya establecidos como es la revisión crítica, la repetición de la recolección, la tabulación y el manejo de la información. En el presente proyecto primero se deberá analizar con criterio toda información sobre el funcionamiento de sistemas de bombeo solar fotovoltaico, a más de una vez implementado el sistema se tabularán los datos obtenidos experimentalmente para realizar un análisis apropiado de la cantidad de fluido impulsado hacia el tanque de almacenamiento en función de la radiación solar existente en aquel día.

3.8. Técnicas de comprobación de la hipótesis

En el actual proyecto se tomarán en cuenta algunos criterios para la comprobación de la hipótesis que se describen a continuación:

- Analizar los resultados estadísticos, resaltando en tendencias de acuerdo con los objetivos el general, los específicos e hipótesis.
- Correcta interpretación de los resultados.
- Comprobación de la hipótesis planteada.
- El establecimiento de conclusiones y recomendaciones con relación a los objetivos de proyecto de investigación.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

Antes de realizar el dimensionado e implementación del sistema de bombeo solar fotovoltaico más adecuado, es necesario conocer primeramente el lugar donde se ubicará el sistema didáctico, para después poder analizar los tipos de sistemas existentes con sus respectivas ventajas y desventajas, los subsistemas empleados, esto luego de haber realizado una investigación pertinente en libros, papers, artículos, etc.

4.1. Análisis de los resultados

Se conoce que el sistema se implementará en la terraza del bloque C de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga, por ende, el espacio de trabajo no es muy amplio y se necesita que el sistema sea didáctico para que los estudiantes realicen pruebas sobre bombeo solar. Un sistema didáctico debe ser de dimensiones no muy grandes y de fácil manipulación, para esto se dispondrá en dos niveles para lograr obtener un punto de partida de bombeo de agua hacia un punto más alto, para lograr simular altura se deberá utilizar algún artificio o elemento ya que el módulo no deberá tener ser muy alto.

Por otra parte, los sistemas de bombeo solar pueden tener un amplio rango de aplicaciones y de esto dependerá su potencia, como el módulo será didáctico su potencia será baja; ya que la cantidad de agua a ser elevada no será mucha. Los componentes principalmente involucrados en un sistema de bombeo solar fotovoltaico son: el generador fotovoltaico y la bomba solar además del acumulador de agua y el subsistema

de instrumentación. El generador fotovoltaico consiste prácticamente de uno o más paneles solares, el subsistema motor – bomba se refiere en sí a una bomba de agua, los tanques almacenadores de agua son dos; uno que funcione como pozo y el otro como descarga con la capacidad necesaria de agua y el subsistema de instrumentación conformado por un contador de volumen, una válvula manual reguladora de presión, un medidor de presión y sensores de nivel, cada uno de estos componentes se lo analizará a continuación:

4.1.1. Análisis generador fotovoltaico

El generador fotovoltaico tiene como función la de captar la energía del sol en forma de radiación y transformar esta energía en energía continua para accionar la bomba solar. La radiación es absorbida por uno o varios paneles solares que conforman el generador fotovoltaico, la selección dependerá de factores como la dimensión de la zona de trabajo y la potencia requerida por la aplicación. La potencia con la que deberá contar el generador fotovoltaico estará en función del volumen de agua que se requerirá bombear y la altura.

Un panel solar está constituido por celdas fotovoltaicas; las cuales están fabricadas en material monocristalino o policristalino; de esto dependerá la apariencia, dimensión, eficiencia y potencia del panel solar. Los paneles fotovoltaicos construidos con celdas monocristalinas como primera observación son de color gris, tienen mayor eficiencia que los elaborados con celdas policristalinas, es decir, que requerirán menor área de captación de radiación solar que se reduce a menor espacio ocupado en la zona de trabajo; por esta razón son de un mayor costo en su fabricación encareciendo al sistema

de bombeo solar. Los paneles contruidos con celdas policristalinas son de un color azul marino, poseen menor eficiencia que los paneles monocristalinos, o sea, requieren mayor superficie para absorber radiación solar que se traduce en mayor ocupación en el espacio de trabajo, son elementos de menor costo económico en su fabricación lo que hace más económico al sistema de bombeo solar ideal para módulos didácticos o de prueba.

4.1.2. Análisis subsistema motor - bomba

El subsistema motor - bomba deberá trabajar con energía alterna o continua de esto dependerá si el sistema de bombeo solar fotovoltaico disponga o no de un convertidor de corriente, como esta energía vendrá dada por el generador fotovoltaico la potencia de la bomba solar deberá por lo menos ser igual a la de los paneles solares. Entonces el motor deberá ser de corriente continua o alterna y la bomba deberá ser centrífuga o de desplazamiento positivo que son bombas generalmente fabricadas para este tipo de sistemas de bombeo solar de baja potencia y en conjunto este subsistema motor - bomba deberá ser de superficie o sumergible dependiendo de la aplicación.

4.1.3. Análisis subsistema tanque de agua

Primeramente, se establecerá la cantidad de tanques de agua necesarios en el sistema; para luego poder establecer la capacidad que dispondrán, entonces se deberá conocer la cantidad de agua empleada en la aplicación del módulo de bombeo solar, de antemano se sabe que el módulo será didáctico. Los tanques de agua generalmente están fabricados de polietileno, fibra de vidrio, latón, madera, etc., el material del tanque otra vez dependerá del volumen de agua y de las condiciones climáticas donde se deba

situar, el material de fabricación del tanque más utilizado por su apariencia y durabilidad es el de polietileno o plástico.

4.1.4. Análisis subsistema de instrumentación

Como se tratará de un módulo didáctico de dos niveles ubicado en la terraza del establecimiento educativo, para poder simular altura a la que se deberá bombear el agua es necesario implementar un instrumento que simule altura este puede ser un serpentín o un regulador de presión. El serpentín fabricado de tubería plástica o de metal con codos de 90° simula altura en función de las pérdidas hidráulicas existentes en la tubería; estas pérdidas se traducen en metros con ayuda de fórmulas, si el serpentín o la tubería no es muy larga las pérdidas no serán considerables. La altura que emula un regulador de presión está en función de la presión regulada; y esta depende de las características que disponga la bomba de agua; entonces la única limitación es el rango de presión que brinda la bomba por lo cual emular más altura es más sencillo. Los reguladores pueden ser auto – operados (manuales) o pilotados; su selección dependerá de algunos factores como es la aplicación, sensibilidad, eficiencia, etc.

Ya que se simulará altura con un regulador manual de presión se necesitará un manómetro para conocer la presión exacta y poder transformarla en altura. Se necesitará también conocer la cantidad de agua bombeada a la altura preestablecida, para lo cual se dispondrá de un contador de volumen de agua en la planta de bombeo fotovoltaico,

Otro instrumento que deberá utilizarse es un sensor de nivel de líquido como primera función será la de sensar el nivel bajo en el tanque de la planta inferior donde se situará la bomba solar para evitar que esta trabaje en vacío y como segunda función en el tanque

del nivel superior para sensar cuando el nivel del líquido alcance un nivel alto. Los sensores de nivel utilizan dos métodos para sensar el nivel, una de forma directa midiendo la altura del líquido el más utilizado es con un flotador y la segunda de forma indirecta aprovechando las propiedades del líquido, como ejemplo los ultrasónicos, capacitivos, resistivos, etc. De igual manera todo dependerá de la aplicación que se le dé para que amerite su costo.

Y para poder corroborar si el generador fotovoltaico y la moto – bomba son los adecuados se necesitará disponer de un contador de energía que será conectado entre el panel solar y el controlador de la bomba.

Para medir la irradiancia solar (potencia solar) se puede utilizar una estación meteorológica o una datalogging portátil cuyos valores medidos serán almacenados en la unidad de memoria, datos que serán posteriormente descargados y procesados para determinar la irradiación solar por unidad de área (energía solar).

4.2. Comprobación de la hipótesis

En el actual proyecto de investigación se procederá a comprobar la hipótesis mediante un método cuantitativo, es decir mediante tablas estadísticas que muestran a través de la práctica en el módulo didáctico de bombeo, para lo cual se sugiere seguir algunos pasos, el primero plantear la hipótesis que sería: ¿se puede cuantificar la cantidad de agua bombeada aprovechando la radiación solar a una altura determinada? Como segundo y tercer paso sería plantear una hipótesis nula y alternativa y mediante el desarrollo de la investigación determinar cuál es la hipótesis verdadera.

4.2.1. Hipótesis Nula

No se puede cuantificar el agua bombeada aprovechando la radiación solar a una altura dada mediante el dimensionado e implementación de un módulo didáctico de bombeo solar fotovoltaico en la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE” extensión Latacunga.

4.2.2. Hipótesis Alternativa

Se puede cuantificar el agua bombeada aprovechando la radiación solar a una altura dada mediante el dimensionado e implementación de un módulo didáctico de bombeo solar fotovoltaico en la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE” extensión Latacunga.

CAPÍTULO V

PROPUESTA

Luego de haber realizado un análisis sobre las opciones de construcción y dimensionado del sistema de bombeo fotovoltaico se establece que: para que el módulo sea didáctico, eficiente y accesible económicamente, el diseño y construcción debe ser de un sistema de bombeo solar fotovoltaico con conexión directa. Dicho sistema posee principalmente el subsistema generador o paneles fotovoltaicos, el subsistema motor - bomba y los dispositivos de almacenamiento y descarga de agua, paralelamente para poder medir ciertas variables en el proyecto se utilizarán instrumentos como válvula manual reguladora de presión, manómetro, contador de volumen de agua, sensores de nivel de líquido, entre otros.

Como se dijo anteriormente es indispensable que sea un sistema didáctico para el uso de los alumnos en prácticas de laboratorio, el sistema deberá bombear una cantidad de agua en dos horas aproximadamente 400 litros, para lo cual la estructura tendrá una forma de torre de dos pisos con una altura media de 2 metros, ancho y largo de 1 metro más o menos donde se ubicará el sistema de bombeo fotovoltaico directo, en el primer piso se encontrará el primer tanque almacenador desde donde se bombeará el agua, la bomba solar que será sumergible para reducir el espacio del módulo a más de poder utilizar y conocer el funcionamiento de este tipo de bombas con el respectivo controlador esta y algunos instrumentos como el manómetro, un regulador manual de presión y un contador de volumen de agua, en el segundo piso se encontrará el tanque de descarga

de agua y para concluir con la disposición de los elementos; en un costado entre el primer y segundo piso se encontrará el panel solar.

Se realizará estudios estáticos en la estructura para determinar dimensiones que deberá poseer la estructura para saber si soportará la carga a la que estará sujeta en estudios posteriores, la estructura se muestra en el Anexo A, los estudios estáticos se encontrarán en una sección posterior, se conoce que la estructura se encontrará fabricada con perfil angular de 90° de acero ASTM A36 mejor conocido como acero negro, este material es de gran calidad y muy utilizado en fabricación de estructuras. El esquema del diseño del módulo didáctico es el mostrado a continuación:

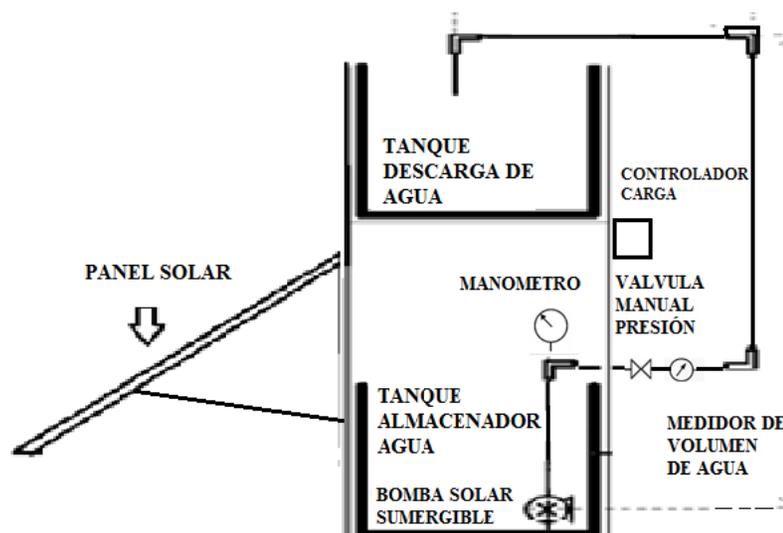


Figura 29. Esquema sistema de bombeo solar directo

El subsistema generador constará de uno o varios paneles solares fabricado con celdas solares policristalinas que son paneles de menor costo con relación a los paneles monocristalinos, la potencia deberá ser la necesaria para suministrar energía suficiente al subsistema motor – bomba que deberá bombear un volumen de agua de 400 litros en dos horas, la bomba solar deberá ser sumergible con conexión directa al generador, es

decir este subsistema bomba - motor es de acero inoxidable para realizar su trabajo dentro del agua y consta de un controlador donde se conecta el panel solar y la bomba para un funcionamiento constante independientemente de la cantidad de radiación del sector de implementación, la bomba comúnmente utilizada es del tipo de desplazamiento positivo este tipo de bombas son de gran eficiencia y de bajo costo.

Los tanques de agua deberán tener una capacidad de almacenamiento de 400 litros como mínimo de un material de polietileno ya que es un material resistente en zonas expuestas a la intemperie. El subsistema de instrumentación como el regulador manual de presión es un elemento que en el actual proyecto servirá para simular altura, ya que el sistema de bombeo es didáctico y no puede ser demasiado grande, la altura a simular se encontrará en función de la bomba solar seleccionada. La medición de la variable caudal se lo realizará con un contador de volumen de agua práctico y de precio económico en el mercado. Y por último se deberá utilizar un piranómetro que mide la radiación solar existente en un día y hora determinada.

Los instrumentos a utilizarse se muestran y especifican a continuación en la siguiente tabla 10:

Tabla 10
Elementos a utilizarse en el proyecto investigativo

EQUIPOS	CANTIDAD	DESCRIPCIÓN
Estructura módulo didáctico	1	Estructura metálica donde se colocarán los elementos constitutivos para un sistema de bombeo solar directo.
Panel solar	1	Dispositivo generador de energía del sistema.

CONTINÚA 

Bomba solar sumergible	1	Elemento impulsador del fluido de trabajo del sistema.
Tanque de agua	2	Elemento donde se deposita el fluido de trabajo con la capacidad preestablecida, uno para almacenar y otro para descargar.
Regulador manual de presión	1	Elemento que controla la presión del fluido por el tubo conductor.
Contador de volumen de agua	1	Dispositivo que medirá la cantidad de agua bombeada por el sistema en un tiempo determinado.
Contador de energía	1	Elemento que se encarga de medir voltaje, corriente, potencia y energía del sistema.

5.1. Datos informativos de la propuesta

Tema de la propuesta: Diseño e implementación de un módulo didáctico de bombeo solar fotovoltaico

Localización: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga

Dirección: Provincia de Cotopaxi, Cantón Latacunga, Calle Quijano y Ordoñez y Hermanas Páez, Laboratorio de Energía Renovables (terrace del bloque C)

Tipo de Institución: Educativa

Tamaño de Institución: Grande

Beneficiario: Alumnos de la Carrera de Ingeniería Electromecánica, en el área de las energías renovables.

5.2. Objetivos

5.2.1. Objetivo general

Dimensionar una planta de bombeo solar fotovoltaico directo e implementarla para que se pueda cuantificar el agua que será capaz de bombear la planta a una altura determinada por medio de la radiación solar en instalaciones de la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE” extensión Latacunga.

5.2.2. Objetivos específicos

- Establecer características de operación de la planta de bombeo solar fotovoltaico directo para diseñarla.
- Realizar el dimensionado de la planta de bombeo solar fotovoltaico directo e implementarla para su uso en las respectivas pruebas.
- Cuantificar el agua que puede ser bombeada en el sistema de bombeo solar fotovoltaico directo por medio de un medidor de volumen de agua aprovechando la captación de radiación solar a una altura regulada por una válvula manual de presión en el lugar de implementación.
- Calcular el rendimiento del sistema moto – bomba solar; que se da por la relación entre la potencia de entrada y la potencia de salida.

5.3. Antecedentes de la propuesta

Como es conocido la energía eléctrica es un factor muy importante en la vida de las personas, ya que por medio de este se realizan casi todas por no decirse todas las actividades cotidianas del ser humano. La energía eléctrica se ha venido transformando

a partir de fuentes fósiles como es el petróleo que a más de ser un recurso agotable representa su extracción y refinamiento una acción perjudicial para el medio ambiente, por esto la necesidad de que se cambie la forma de generar energía eléctrica por medio de fuentes renovables amigables con el medio ambiente, una principal fuente alternativa es la energía solar que puede ser aprovechada de muchas formas, una de ellas es la radiación solar que captada por medio de paneles fotovoltaicos se puede transformar en energía eléctrica utilizable en diferentes aplicaciones.

A medida que la población mundial aumenta; crecen las necesidades humanas básicas primarias y estas dependen de un servicio eléctrico eficiente, y esto no se puede lograr en todas las regiones especialmente las rurales donde el servicio eléctrico no cubre toda la región. Por eso que dentro de este aspecto la opción es la de utilizar fuentes alternativas de energía eficientes y amigables con el medio ambiente, una de estas es el aprovechamiento de la energía solar para transformarla en energía eléctrica indispensables en la utilización de aplicaciones cotidianas.

En conclusión, una aplicación del uso de energías no convencionales es el bombeo de agua con energía solar fotovoltaica en sistemas aislados, este tipo de tecnología ha demostrado a través de los años ser efectiva en el suministro de agua para comunidades rurales ya que tienen como principales beneficios el de ser sistemas relativamente pequeños, con mucha fiabilidad y que requieren de una inversión inicial y nada más ya que no requieren de mantenimiento.

5.4. Justificación de la propuesta

Con los antecedentes propuestos en el apartado preliminar y el actual objetivo de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga que es el de otorgar a la sociedad profesionales competentes con conocimientos que van a la par con la actualidad en el mundo, es indispensable que los estudiantes tengan a su alcance medios didácticos con última tecnología.

Por medio del módulo didáctico de bombeo solar fotovoltaico que se quiere diseñar e implementar en la Universidad, los estudiantes, especialmente los de la carrera de Ingeniería Electromecánica afianzarán sus conocimientos en el ámbito de las energías renovables mediante prácticas de laboratorio en el lugar dispuesto para esto.

5.5. Fundamentación propuesta

En el actual proyecto de investigación la propuesta establecida se basa en la necesidad de los estudiantes de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga en tener un módulo didáctico donde puedan realizar prácticas en el área de las energías renovables principalmente en el ámbito del bombeo de agua por medio del aprovechamiento de la energía solar adquiriendo conocimientos previos e indispensables para ejercer una adecuada profesión en lo que es la Ingeniería Electromecánica.

5.6. Diseño de la propuesta

La propuesta planteada en el presente proyecto dispone de pasos o tópicos a desarrollarse secuencialmente ya que cada uno depende del anterior para su realización,

de esta forma se disponen los siguientes puntos para realizar un dimensionado adecuado de un sistema de bombeo fotovoltaico:

1. Establecimiento de parámetros iniciales necesarios en el dimensionado
2. Análisis de la energía hidráulica
3. Análisis de la energía solar disponible
4. Dimensionado y selección de equipos fotovoltaicos
 - Dimensionado y selección del generador fotovoltaico
 - Mes de dimensionado para el generador fotovoltaico
 - Dimensionado y selección del motor – bomba solar
 - Dimensionado y selección de las instalaciones hidráulicas e instrumentación.
 - Dimensionado y selección de las protecciones eléctricas e hidráulicas

5.7. Metodología para ejecutar la propuesta

Con lo propuesto anteriormente, se expone que en esta sección se detallarán todos los puntos mencionados y se desglosarán para realizar un correcto dimensionado e implementación de un sistema de bombeo fotovoltaico directo.

5.8. Establecimiento de parámetros iniciales

Estos parámetros son el punto de partida del dimensionado del sistema de bombeo solar fotovoltaico directo, en general son dimensiones o especificaciones estimadas físicas, climáticas, geográficas, que nos permiten iniciar un adecuado cálculo o análisis del sistema, estos son:

- Altura geométrica de bombeo (h_g): 2,2 metros
- Fluido de trabajo: agua
- Temperatura del fluido de trabajo: 25°C

5.8.1 Determinación de la altura hidráulica de bombeo

Se establecerá una altura geométrica promedio de 2,2 metros, además se deberá simular altura regulando la presión con un regulador manual de presión.

La altura hidráulica de bombeo es la altura total o presión expresada en metros que debe vencer la bomba, para ello se debe calcular las pérdidas hidráulicas que existen en el sistema hidráulico. Con lo cual se necesitará establecer primeramente algunos parámetros:

- Volumen de agua $V = 0,4 \text{ m}^3$
- Caudal del agua por día $Q_d = 400 \text{ l/día}$
- Caudal en una hora de trabajo $Q_h = 200 \text{ l/h} = 3,333 \text{ l/min} = 0,056 \text{ l/s} = 5,556 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s} = 0,2 \text{ m}^3/\text{h}$
- Tiempo de operación: 2 horas/día (tiempo realización práctica de laboratorio)
- El fluido es agua a una temperatura ambiente $T = 25^\circ\text{C}$
- La densidad del agua $\rho = 1000 \text{ Kg/m}^3$
- La viscosidad relativa del agua $\mu = 0,891 \times 10^{-3} \text{ kg/m.s}$

Para cálculos posteriores se calculará el diámetro de la tubería de agua del sistema de bombeo solar fotovoltaico directo manipulando la fórmula empírica de Breese siguiente:

$$D_T = 0,5873 \times N^{0,25} \times \sqrt{Q_h} \quad \text{Ec. (21)}$$

Donde:

D_T : diámetro de la tubería en [m]

N : número de horas de operación

Q_h : caudal del fluido [m^3/s]

$$D_T = (0,5873)(2^{0,25}) \left(\sqrt{0,00005556} \right)$$

$$D_T = 0,005 \text{ m} = 0,197 \text{ pulg} \approx \frac{1}{4} \text{ pulg}$$

Para un adecuado análisis matemático se sobredimensionará la tubería es decir se utilizará una tubería de $1/2$ pulgada de material PVC existente en el mercado ecuatoriano, las características de este tipo de tubo con cédula 20, diámetro interno de la tubería tomado de la tabla 5: $\phi_i = 0,0178 \text{ m}$, la rugosidad tomado de la tabla 11: $\epsilon = 1,5 \times 10^{-6} \text{ m}$, y de acuerdo a la disposición del módulo didáctico la longitud de la tubería será: $L = 3,2 \text{ m}$.

Tabla 11

Rugosidad absoluta en tuberías según el tipo de material

Rugosidad absoluta de materiales			
Material	ϵ (mm)	Material	ϵ (mm)
Plástico (PE, PVC)	0,0015	Fundición asfaltada	0,06-0,18
Poliéster reforzado con fibra de vidrio	0,01	Fundición	0,12-0,60
Tubos estirados de acero	0,0024	Acero comercial y soldado	0,03-0,09
Tubos de latón o cobre	0,0015	Hierro forjado	0,03-0,09
Fundición revestida de cemento	0,0024	Hierro galvanizado	0,06-0,24
Fundición con revestimiento bituminoso	0,0024	Madera	0,18-0,90
Fundición centrifugada	0,003	Hormigón	0,3-3,0

Fuente: (Universidad de Castilla La Mancha, 2018)

Para el cálculo de las pérdidas hidráulicas en este sistema se requiere conocer parámetros físicos como la velocidad, en su mayoría las pérdidas se dan por fricción, entonces como primer paso se deberá calcular la velocidad del fluido en la tubería utilizando la Ec.(16):

$$v = Q/A \text{ [m/s]}$$

$$A = \pi \times (\phi_i/2)^2 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$A = \pi \times (0,0178\text{m}/2)^2 = 2,488 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$v = \frac{5,556 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}}{2,488 \times 10^{-4} \text{ m}^2}$$

$$v = 0,223 \text{ m/s}$$

Una vez obtenida la velocidad, se procede a calcular el número de Reynolds con la Ec. (15):

$$R_e = \frac{v\phi_i\rho}{\mu}$$

$$R_e = \frac{(0,223 \text{ m/s})(0,0178\text{m})(1000 \text{ Kg/m}^3)}{0,891 \times 10^{-3} \text{ Pa.s}}$$

$$R_e = 4454,994 \approx 5000$$

Con el cálculo y criterios previos del número de Reynolds se establece que el fluido es turbulento, ya que se encuentra en un valor mayor a 4000, con este valor y calculando el de la rugosidad relativa se puede determinar el factor de fricción (f).

$$\frac{D}{\epsilon} = \frac{\phi_i}{\epsilon}$$

$$\frac{D}{\epsilon} = \frac{0,0178m}{1,5 \times 10^{-6}m}$$

$$\frac{D}{\epsilon} = 1186,667 \approx 10000$$

De la figura 23 (Diagrama de Moody) se determina que el valor del factor de fricción tiene un valor de 0,038 aproximado, intersecando los valores del número de Reynolds y la rugosidad relativa. Con el valor del factor de fricción se calculan las pérdidas mayores mediante la Ec. (17) que se dan a lo largo de la tubería ocasionadas por la fricción existente entre el agua y la pared de la tubería:

$$h_{L,mayor} = f \frac{L}{\phi_i} \frac{v^2}{2g}$$

$$h_{L,mayor} = \frac{(0,038)(3,2m)(0,223 \text{ m/s})^2}{(0,0178m)(2)(9,81 \text{ m/s}^2)}$$

$$h_{L,mayor} = 0,017 \text{ m}$$

Además de las pérdidas del fluido por fricción a lo largo de la tubería (pérdidas mayores), existen pérdidas de carga por fricción en los accesorios de la tubería llamadas pérdidas menores, los accesorios en este sistema son codos de 90°, medidor de volumen de agua, regulador o controlador manual de presión y un manómetro, se procederá a calcular las pérdidas para cada accesorio para lo cual primeramente de la tabla 4 se toma el coeficiente de pérdida K según cada accesorio que será utilizado en la Ec.(18).

Para los codos de 90° el coeficiente de pérdida K tiene un valor de 0,75 y para el accesorio Te el factor K es de 1,75 y se procede a calcular la las pérdidas menores para estos accesorios:

$$h_{L,menor1,1} = K_1 \frac{v^2}{2g} [m]$$

$$h_{L,menor1,1} = 0,75 \frac{(0,223 \text{ m/s})^2}{(2)(9,81 \text{ m/s}^2)}$$

$$h_{L,menor1,1} = 1,901 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$h_{L,menor1,2} = K_1 \frac{v^2}{2g} [m]$$

$$h_{L,menor1,2} = 1,75 \frac{(0,223 \text{ m/s})^2}{(2)(9,81 \text{ m/s}^2)}$$

$$h_{L,menor1,2} = 4,436 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Al contador de volumen, manómetro y al regulador manual de presión se le toma como un accesorio Te, para el cálculo de cada accesorio el valor del coeficiente de pérdida K es de 1,75. Además como ya se había establecido la válvula manual reguladora simulará también una caída de presión o altura dinámica necesaria para obtener los 30 metros mínimos que la bomba deberá impulsar el agua:

$$h_{L,menor2} = K_2 \frac{v^2}{2g} [m]$$

$$h_{L,menor2} = 1,75 \frac{(0,223 \text{ m/s})^2}{(2)(9,81 \text{ m/s}^2)}$$

$$h_{L,menor2} = 4,436 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Ya conocidos los valores de todas las pérdidas, se procede a sumarlos para sacar un valor total, para las pérdidas en los codos se deberá multiplicar la pérdida menor 1 por la cantidad de codos utilizados en el subsistema red de tubería con un total de 3 codos de 90°, la pérdida menor en el accesorio Te, para las pérdidas menores en los accesorios

como la Te, el contador de volumen, manómetro y regulador manual se deberá multiplicar el valor de pérdidas menores 2 por la cantidad de 4, así:

$$h_{L,menor1,1,total} = 3 \times h_{L,menor1} = 0,006 \text{ m}$$

$$h_{L,menor2,total} = 4 \times h_{L,menor2} = 0,018 \text{ m}$$

$$h_{L,menor,total} = h_{L,menor1,total} + h_{L,menor2,total} = 0,024 \text{ m}$$

Las pérdidas hidráulicas totales se dan por la suma de las pérdidas mayores y menores donde se utilizará la Ec. (19) teniendo lo siguiente:

$$h_{L,total} = h_{L,mayor} + h_{L,menor,total}$$

$$h_{L,total} = 0,017 \text{ m} + 0,024 \text{ m}$$

$$h_{L,total} = 0,041 \text{ m}$$

Para cerciorarse que el valor anteriormente calculado se encuentra correcto, se puede utilizar la expresión Ec. (20), ya que el diámetro de la tubería es constante en toda su longitud:

$$h_{L,total} = \left(f \frac{L}{\phi_i} + \sum K \right) \frac{v^2}{2g} \quad [m]$$

$$\sum K = 4K_1 + 3K_2 = 3(0,75) + 4(1,75) = 9,25$$

$$h_{L,total} = \left((0,038) \frac{(3,2m)}{(0,0178m)} + \sum (9,25) \right) \frac{(0,223 \text{ m/s})^2}{2(9,81 \text{ m/s}^2)}$$

$$h_{L,total} = 0,041 \text{ m}$$

Una vez calculadas las pérdidas hidráulicas o pérdidas de carga en función de la altura, se procede a sumar estas con la altura estática o geométrica y la altura en función de la presión regulada para obtener una altura total (h) que deberá tener un valor alrededor de

los 50 metros mencionados anteriormente, la altura total cual será utilizada en el dimensionado de los componentes de bombeo solar fotovoltaico más adelante, así:

$$h = h_{L,total} + h_g + h_r$$

$$h = 0,041 \text{ m} + 2,2 \text{ m} + 27,759 \text{ m}$$

$$h = 30 \text{ m}$$

5.8.2 Análisis de la energía hidráulica

Como primer paso en el dimensionado de los componentes de un sistema de bombeo fotovoltaico es importante conocer el volumen de agua diario que se va a necesitar. En este caso en particular el módulo fotovoltaico de prueba es de conexión directa, entonces para el dimensionamiento del sistema de bombeo se establecerá que el consumo de agua será de unos 400 litros en las de práctica.

Por lo general se realizarán 2 horas de práctica y el caudal total por día deberá dividirse para estas dos horas, es decir, el caudal de prueba para la investigación es de 200 litros/hora, entonces para el análisis en el sistema didáctico de bombeo solar directo, se establece que para el almacenamiento del agua se tendrá tanques de 400 litros mínimo de capacidad.

Para los respectivos cálculos se debe calcular el caudal necesario para la prueba en metros cúbicos por hora:

$$Q = 400 \frac{\text{ltrs}}{\text{día}} \times \frac{1 \text{ día}}{2 \text{ h}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ ltrs}} = 0,2 \text{ m}^3/\text{h}$$

5.8.3 Análisis de la energía solar disponible

Para poder calcular la potencia del generador fotovoltaico, antes se necesita conocer la radiación solar disponible en el lugar de implementación del módulo de bombeo fotovoltaico. Los datos de radiación solar mensual conocidos como irradiancia son tomados de base de datos como en este caso del centro de datos de la NASA. Para ello se necesita conocer las coordenadas del lugar en este caso instalaciones de la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE” extensión Latacunga (Latitud: -0,9357 Longitud: -78,6117) e ingresarlas en la página web del centro de datos de la NASA, y así obtener la tabla con los datos mensuales de radiación como se muestra a continuación:

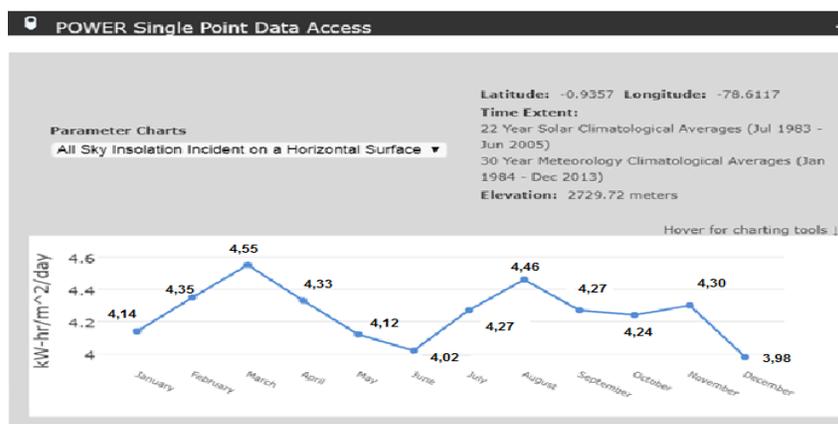


Figura 30. Datos radiación solar mensual Latacunga
Fuente: (NASA Power, 2018)

5.8.4 Dimensionado y selección de equipos fotovoltaicos

Realizado el análisis de altura anterior podemos ver que las pérdidas en este sistema son mínimas, por esta razón se simula altura con un regulador de caudal, a partir de esto se procede a calcular la energía hidráulica diaria necesaria para el sistema de bombeo fotovoltaico utilizando la Ec. (1):

$$E_h = \rho g V h \text{ [J]}$$

$$E_h = (1000 \text{ kg/m}^3)(9,81 \text{ m/s}^2)(0,4 \text{ m}^3)(30\text{m})$$

$$E_h = 117720 \text{ [J]}$$

Por lo general la potencia de los paneles solares y bombas está dado en vatios [W], y para el cálculo siguiente se deberá transformar la energía calculada anteriormente a Wh de la siguiente manera:

$$E_h = 117720 \text{ J} \times \frac{1 \text{ Wh}}{3600 \text{ J}} = 32,7 \text{ Wh}$$

a. Dimensionado y selección del generador fotovoltaico

Mes de dimensionado para el generador fotovoltaico

Para los respectivos cálculos se necesitará conocer un valor de irradiancia en un mes determinado, este se denomina mes de dimensionado y es aquel donde el cociente entre la energía hidráulica y la irradiancia tiene el valor más alto, este mes es por lo tanto donde existirá mayor déficit de energía. Para esto se elaborará una tabla donde se encontrarán los coeficientes de energía para cada mes, y se muestra a continuación:

Tabla 12
Coeficientes energéticos (Enero a Junio)

Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Coeficiente Energético	$\frac{0,056}{4,14}$	$\frac{0,056}{4,35}$	$\frac{0,056}{4,55}$	$\frac{0,056}{4,33}$	$\frac{0,056}{4,12}$	$\frac{0,056}{4,02}$
	0,0135	0,0129	0,0123	0,0129	0,0136	0,0139

Tabla 13
Coeficientes energéticos (Julio a Diciembre)

Mes	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Coeficiente Energético	$\frac{0,056}{4,27}$	$\frac{0,056}{4,46}$	$\frac{0,056}{4,27}$	$\frac{0,056}{4,24}$	$\frac{0,056}{4,30}$	$\frac{0,056}{3,98}$
	0,0131	0,0126	0,0131	0,0132	0,0130	0,0141

Analizando la tabla anterior se observa que el valor más alto corresponde a 0,0141 que es el valor de la columna del mes de diciembre, es decir que este mes corresponde al mes de dimensionado con una irradiancia de $3,98 \text{ KWh}/\text{m}^2 \cdot \text{día}$.

Los datos necesarios y datos previamente analizados para el respectivo cálculo de la potencia del generador fotovoltaico son mostrados a continuación:

- Energía hidráulica necesaria diaria $E_h = 32,7 \text{ Wh}$
- Irradiancia $I = 3,98 \text{ KWh}/\text{m}^2 \cdot \text{día}$
- Aprovechamiento solar en práctica $t = 2h$
- Irradiación $G = 1000 \text{ W}/\text{m}^2$
- Rendimiento medio de un subsistema motor – bomba tomado de estudios empíricos vistos anteriormente $\eta_{mb} = 0,3$

La expresión matemática Ec. (2) permite calcular la potencia pico del generador fotovoltaico trabajando a una temperatura ambiente 25°C y con una irradiación de $1000 \text{ W}/\text{m}^2$.

Antes se debe calcular la superficie del panel, y el dato faltante la energía eléctrica se lo puede calcular con ayuda de la Ec. (4):

$$E_e = \frac{E_h}{\eta_{m-b}} = \frac{32,7 \text{ Wh}}{0,3} = 109 \text{ Wh} = 0,109 \text{ kWh}$$

Una vez obtenido el valor de la energía eléctrica se procederá a calcular la potencia que deberá poseer el generador fotovoltaico y la superficie de captación:

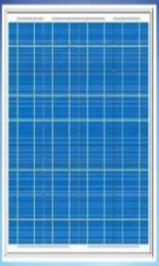
$$P_e = \frac{E_e}{t} = \frac{0,109 \text{ kWh}}{2 \text{ h}} = 0,0545 \text{ kW}$$

$$P_e = P_p$$

Por medio de los cálculos anteriores se puede seleccionar un generador fotovoltaico adecuado, con una potencia igual o superior a la calculada, para este caso se escogerá un panel fotovoltaico de una manera técnica, eficiente y económica con el cual se suplirán con las necesidades eléctricas del sistema de bombeo fotovoltaico, con un adecuado margen de error, en la siguiente tabla se muestran dos tipos de panel solar:

Tabla 14

Selección de paneles solares

Panel solar policristalino SYNTHESIS POWER SP85P	Panel solar monocristalino SolarLand SLP 85S-12M
 <p>Figura 31. Panel solar policristalino Fuente: (Synthesis Power, 2018)</p>	 <p>Figura 32. Panel solar monocristalino Fuente: (Webosolar, 2018)</p>

CONTINÚA



Potencia nominal (Pmax): 85 [W]	Potencia nominal: 85 [W]
Vmp: 17.78 [V]	Voc: 21.9 [V]
Voc: 21.33 [V]	Vmp: 18.2 [V]
Isc: 5.35 [A]	Isc: 9.6 [A]
Imp: 4.78 [A]	Imp: 8.8 [A]
Voltaje máximo del sistema: 1000 [V]	Longitud: 1500 [mm]
Longitud: 970 [mm]	Ancho: 675 [mm]
Ancho: 685 [mm]	Peso: 12 [kg]
Peso: 7.3 [kg]	

El panel seleccionado es el del lado izquierdo que es un panel policristalino, cumple con los requisitos de potencia que sea igual o mayor a la calculada, es un panel solar más grande en términos de dimensión que un panel monocristalino por ende menos eficiente, pero como es para un módulo didáctico lo que se requiere es que sea accesible en términos costo – eficiencia, la ficha técnica, curvas características de voltaje – corriente, características eléctricas y mecánicas del panel solar seleccionado son mostrados en el Anexo D:

También se puede conocer cuántos paneles fotovoltaicos se van a necesitar para la instalación por medio de la Ec. (7), con un rendimiento del sistema de 0,8 así:

$$N = \frac{E_e}{P_p t}$$

$$N = \frac{109 Wh}{(85W)(2h)}$$

$$N = 0,64 \approx 1$$

b. Dimensionado y selección motor – bomba solar

Una vez seleccionado el generador fotovoltaico se deberá seleccionar el subsistema motor – bomba solar, este subsistema deberá primeramente poder abastecer al sistema de bombeo del caudal diario necesario calculado con anterioridad a la altura requerida y

segundamente sea de una potencia mínima igual al panel solar o a su vez sea mayor. De esta manera se podrá seleccionar una bomba solar eficiente al mismo tiempo económica, entonces la bomba seleccionada es sumergible que trabaja con corriente continua tiene un rango de bombeo de 50 metros, un rango de flujo que van desde los 2,3 a los 7,6 litros por minuto (lpm), potencia de hasta 126 watts y dispone de un controlador donde se conecta principalmente el panel fotovoltaico y la bomba solar, las curvas de funcionamiento y características técnicas y eléctricas se encuentran en los Anexos D, mientras que la bomba solar es la siguiente:



Figura 33. Bomba solar SDS-T-128 con regulador de carga
Fuente: (Sun Pumps, 2018)

Especificaciones bomba solar

- Rango de profundidad: 230 pies (70 metros)
- Rango de Flujo: 0,6-2 GPM (2.3 a 7.6 LPM) ó (138 a 256 l/h)
- Actual máximo de carga: 4,2 Amperios

- Carga máxima de energía: 126 Watts
- Descarga Tamaño: 1/2 "BT NPT o 15mm
- Diámetro Mínimo Bueno: 4 "(100 mm)
- CC Rango de voltaje: 30-Dec

Con los datos proporcionados por las características de funcionamiento del panel solar y del subsistema motor – bomba solar se puede calcular un valor de la potencia de la bomba hidráulica y el caudal pico que puede suministrar mediante ayuda de la Ec.[13] y Ec.[14]:

$$P = \frac{gQh}{\eta_b} \quad [W]$$

$$P = \frac{(9,81 \text{ m/s}^2)(0,056)(70\text{m})}{0,56}$$

$$P = 68,67 \text{ W}$$

$$Q_p = \frac{P_p \eta_b}{gh} \quad [l/s]$$

$$Q_p = \frac{(68,67\text{W})(0,56)}{(9,81 \text{ m/s}^2)(70\text{m})}$$

$$Q_p = 0,056 \text{ l/s} = 3,36 \text{ l/min} = 201,6 \text{ l/h}$$

5.8.5 Selección instalaciones hidráulicas e instrumentación

a. Red de tubería

El dimensionado y seleccionado en cuestión depende básicamente de cinco parámetros, estos son: la presión que soportará internamente, la temperatura a la que se

someterá, la corrosión es decir el tipo de fluido que transportará, el diámetro de la tubería y el costo económico que tendrá. En este estudio la temperatura será casi constante, no tendrá variaciones importantes que ameriten un estudio al igual que la corrosión ya que el fluido de trabajo es agua y no se requiere que la tubería sea indestructible con el pasar del tiempo. Los parámetros que si requieren atención son la presión, el diámetro y el costo de la tubería, El diámetro de la tubería depende generalmente de la cantidad de fluido que pasará por esta en un tiempo determinado y además se debe tener en cuenta algo muy importante que es el diámetro de orificio de salida de agua del subsistema motor – bomba (1/2 pulgada), sabiendo lo dicho anteriormente se corroboró el diámetro calculado de la tubería en un apartado 5.7.1 Ec.(21) anterior dando como resultado una tubería de ½ pulgada de diámetro. La presión que soportará la tubería dependerá del cambio en la altura manométrica y de la máxima presión a la cual la bomba impulse el fluido que es de 100 PSI; la presión que soporta la tubería depende del espesor de las paredes de esta. Finalmente, el costo de la tubería dependerá del material en que esté fabricada esta que de igual forma está ligado directamente a los parámetros anteriores a más caudal mayor el diámetro de la tubería y mayor es el costo, de igual manera con la presión. En conclusión, se deberá seleccionar una tubería que soporte una presión máxima de 100 PSI con un diámetro de ½ pulgada, el material con un costo bajo, de muy buenas características y principalmente disponible en nuestro país es el PVC.

b. Válvula reguladora de caudal

Con anterioridad se estableció que se necesitará instalar una válvula reguladora de caudal en el sistema de bombeo solar fotovoltaico para que cumpla la función de regular

la cantidad de agua que circula por la tubería para lograr simular de esta manera altura, ya que este sistema es didáctico y no existirá tendrá la suficiente altura para lograr los 70 metros. Esta válvula deberá soportar como mínimo la presión máxima que brinda el subsistema motor - bomba que es de 100 PSI a partir de esto se seleccionará el tipo de válvula que se empleará.

c. Contador de volumen de agua

Con el fin de analizar uno de los objetivos del proyecto que es el de lograr cuantificar el fluido impulsado por el sistema de bombeo solar fotovoltaico, se necesitará instalar un medidor de volumen de agua cuya función será valga la redundancia de medir la cantidad de agua que circula por la tubería en un determinado tiempo, para esto el medidor deberá poder acoplarse a la tubería de ½ pulgada y soportar un caudal mínimo de 2,92 litros por minuto que proporciona el subsistema motor – bomba.

5.8.6 Dimensionado y selección de conductor eléctrico y protecciones

Por una parte, el conductor deberá tener un diámetro el cual pueda soportar como mínimo la intensidad eléctrica que circulará por este y que además no se provoque una caída de voltaje excesiva, la intensidad eléctrica que circula por los conductores eléctricos se puede calcular mediante la expresión:

$$I = P/V$$

Donde:

I: intensidad eléctrica en amperes [A]

P: potencia eléctrica máxima del sistema o generador fotovoltaico en [W]

V: voltaje máximo del sistema o generador fotovoltaico en [V]

$$I = 85 \text{ W} / 17,78 \text{ V}$$

$$I = 4,78 \text{ A}$$

El valor de intensidad eléctrica calculado anteriormente de 4,478 A es el mínimo que deberá soportar el conductor eléctrico, por otra parte, el conductor eléctrico deberá soportar estar expuesto a la intemperie del sector de Latacunga como lluvias y sol. Mediante la tabla mostrada a continuación, se selecciona el conductor adecuado 12 AWG el cual puede soportar una intensidad máxima de 25 A.

Como elemento de protección del sistema se selecciona un breaker de dos polos de 10 amperios que se encuentra instalado en el gabinete metálico entre el panel solar y el medidor de energía.

5.9. Diseño mecánico de la estructura mecánica

La estructura deberá ser sometido a un análisis estático, en donde se observará las deformaciones existentes causadas por la carga aplicada por el agua descargada o almacenada a más del factor de seguridad que indicará si las dimensiones de la estructura empleada son las adecuadas. Se dividirá el análisis en dos estudios estáticos principalmente, el primero se supondrá que el agua estará almacenada en el tanque inferior con una capacidad de 1000 litros, es decir equivalentes a unos 1000 kg (ver figura 34, 35 y 36).

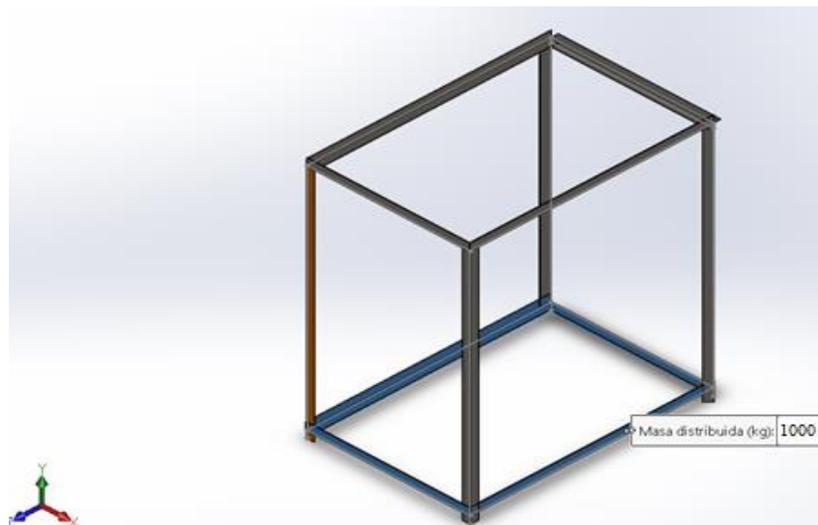


Figura 34. Análisis estático 1 Masa 1000 Kg

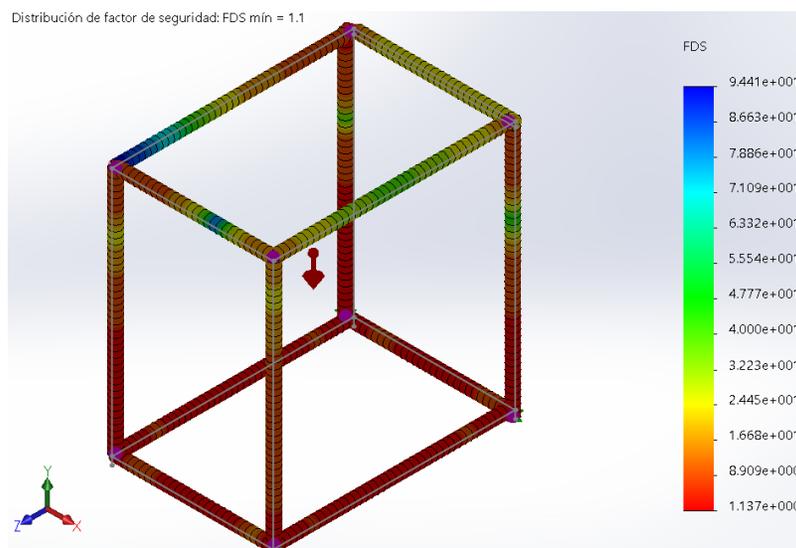


Figura 35. Análisis estático 1 factor de seguridad

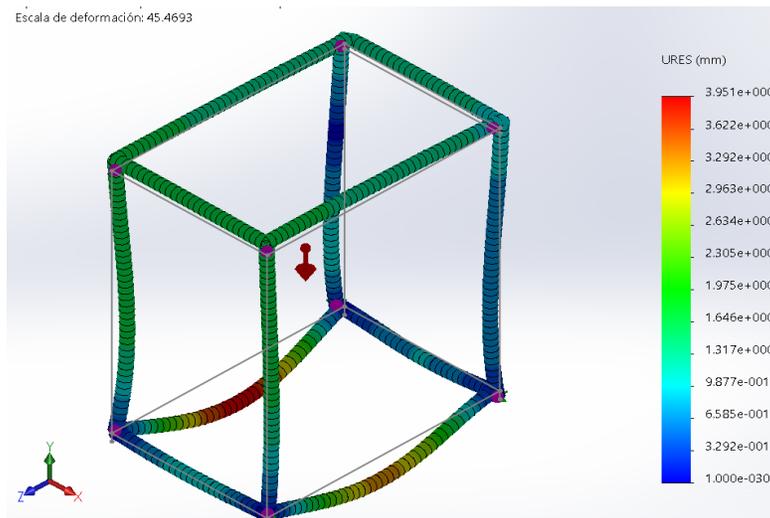


Figura 36. Análisis estático 1 Deformación

El segundo análisis corresponderá cuando la estructura soporte una carga distribuida de 1000 kg, es decir, soportará 500 kg en el primer piso y 500 kg en el segundo piso, como e muestra en las figuras a continuación:

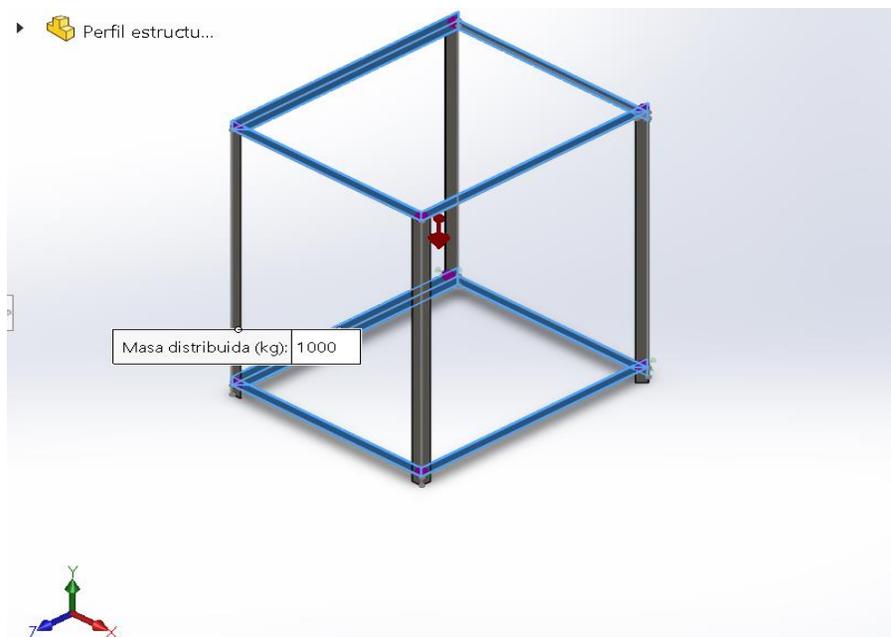


Figura 37. Análisis estático 2 con masa distribuida 1000Kg

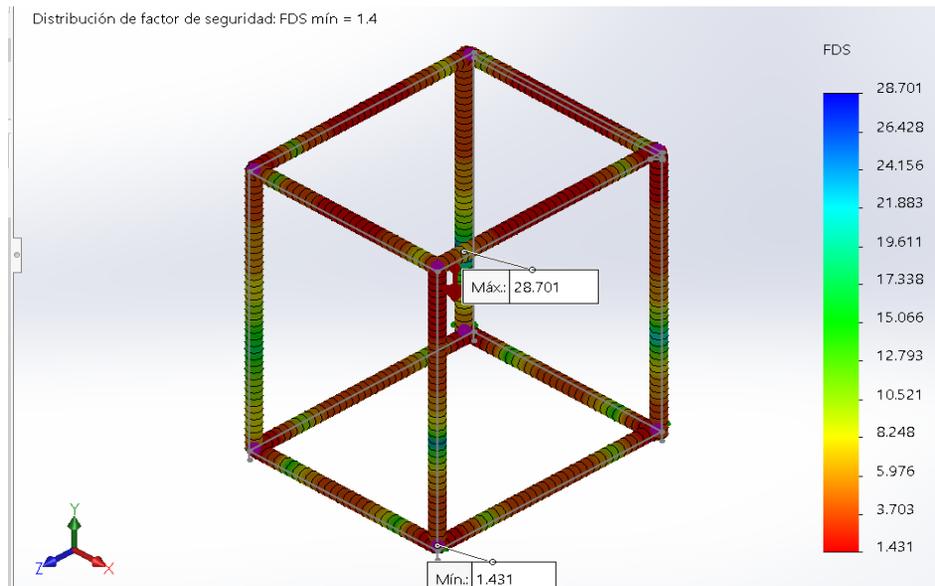


Figura 38. Análisis estático 2 factor de seguridad

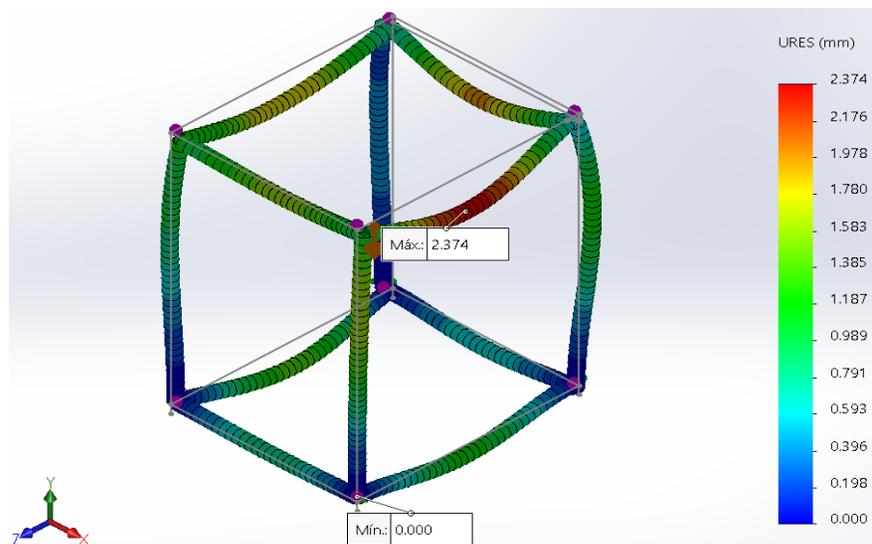


Figura 39. Análisis estático 2 deformación

Observando los gráficos anteriores se puede concluir que la estructura metálica soportará la carga del agua aplicada, al no existir deformaciones importantes dando como valor de factor de seguridad mayor a 1.

5.10. Instalación del módulo didáctico

El módulo didáctico se ubica sobre una estructura metálica con perfil angular 50X50X3 mm de acero negro o llamado también acero A36, la bomba solar se encuentra dentro del tanque almacenador de agua en la primera planta en posición vertical; conectado eléctricamente con cable #12 AWG y protegido con cinta especialmente fabricada para el contacto con el agua al controlador de la misma; que está instalado a un lado de la estructura en un gabinete con protección IP44, el panel solar se encuentra a un costado de la estructura entre el primer y segundo piso conectado eléctricamente al breaker 2P10A y luego al contador de energía eléctrica ubicado de igual manera en el gabinete; contador que de igual forma se encuentra conectado al controlador de la bomba solar, en el segundo piso se encuentra el tanque de descarga. Los sensores de nivel ubicados en su respectivo tanque se encuentran conectados en paralelo con cable 12 AWG al controlador de la bomba y con cinta especial contra agua.

El circuito hidráulico de la descarga de la bomba hacia el tanque superior se realizó con tubería PVC de ½ pulgada y a la salida de la bomba está instalado una válvula manual reguladora de presión junto con un manómetro y un contador de volumen de agua. Los tanques están además conectados entre sí con un circuito hidráulico que tiene como función la recirculación del agua del tanque de descarga hacia el tanque almacenador o para el vaciado del agua hacia algún sifón cercano con tubería PVC de 2 pulgadas con sus respectivas llaves de cierre y apertura.

5.9. Puesta a punto del equipo

De acuerdo a las instrucciones mostradas por el fabricante de la bomba solar que son mostrados en los Anexos E, se hace referencia que para operar con panel fotovoltaico a 15 voltios se debe activar el dip - switch 1 a la posición ON, así mismo como parte de las protecciones del controlador se debe activar el dip - switch 4 a la posición ON previo se deberá realizar la instalación de los sensores de nivel los mismos que son dos, el primero protege que la bomba no trabaje con bajo nivel de agua y el segundo en el tanque de descarga que no pase un nivel superior el líquido. En l figura se muestra un detalle de lo mencionado:

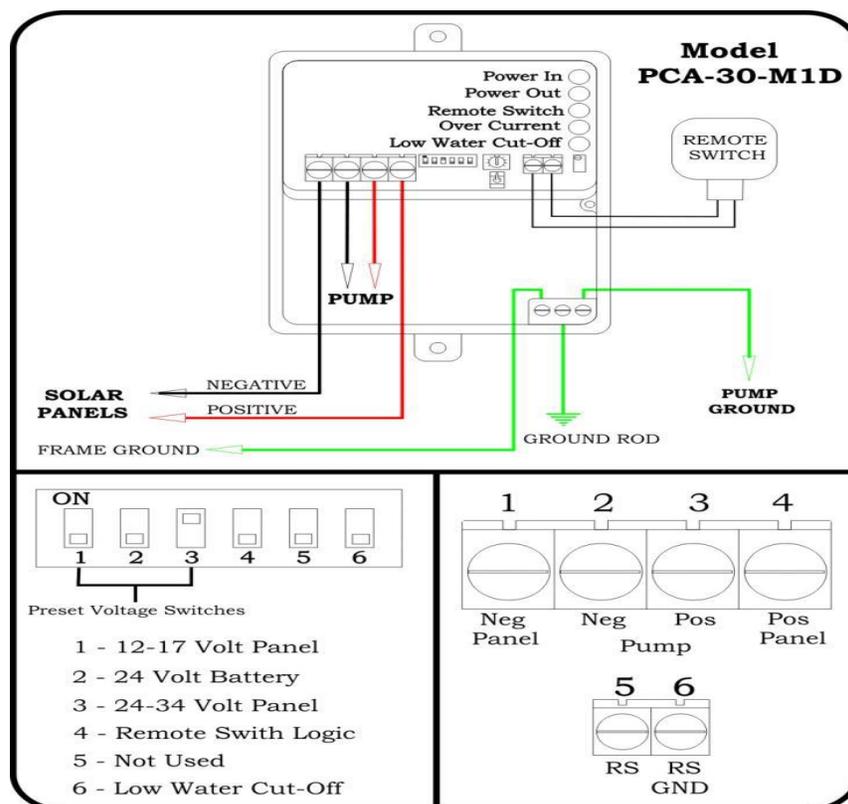


Figura 40. Detalle activación dip - switch

Fuente: (Sun Pumps, 2018)

5.10. Pruebas y resultados

Una vez instalado el equipo y revisado que las instalaciones eléctricas e hidráulicas sean satisfactorias (ver Anexo B y C), se procede a cuantificar el agua que puede ser bombeada en el sistema de bombeo solar fotovoltaico directo y la eficiencia del mismo.

5.10.1. Determinación del volumen de agua bombeado

Para la realización de esta prueba se procede a medir la irradiancia solar empleando el medidor de potencia solar (irradiancia) Datalogging modelo TES 132 y el volumen de agua bombeada a una altura total de 2,2 m empleando el contador de volumen.

Se realizaron dos pruebas en el lapso de dos horas cada una; de 9 am a 11 am y de 12 pm a 2 pm. Las curvas de irradiancia solar se indican en las figuras 38 y 39

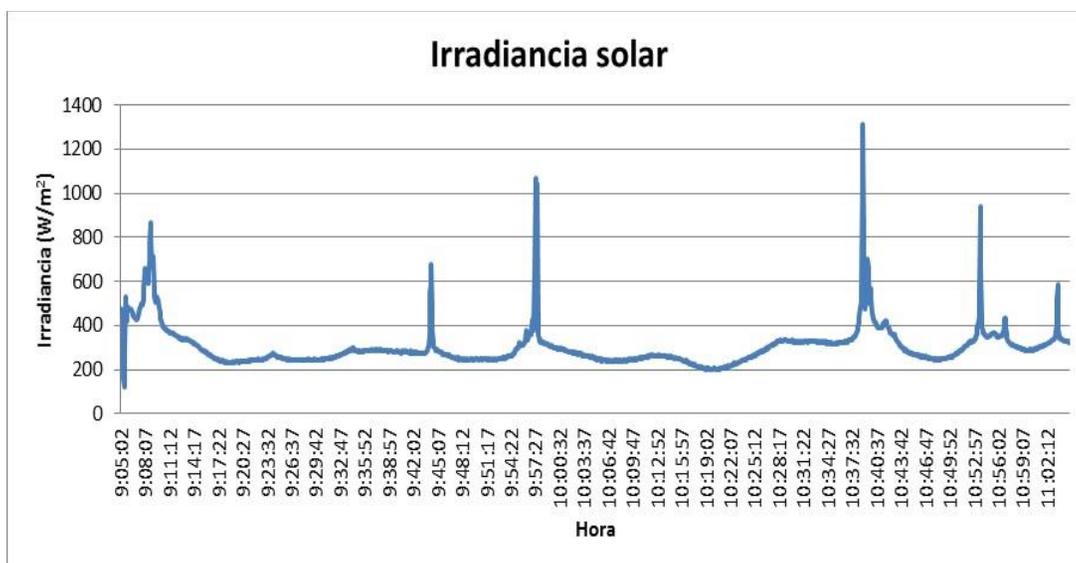


Figura 41. Medición irradiancia solar en horas de la mañana

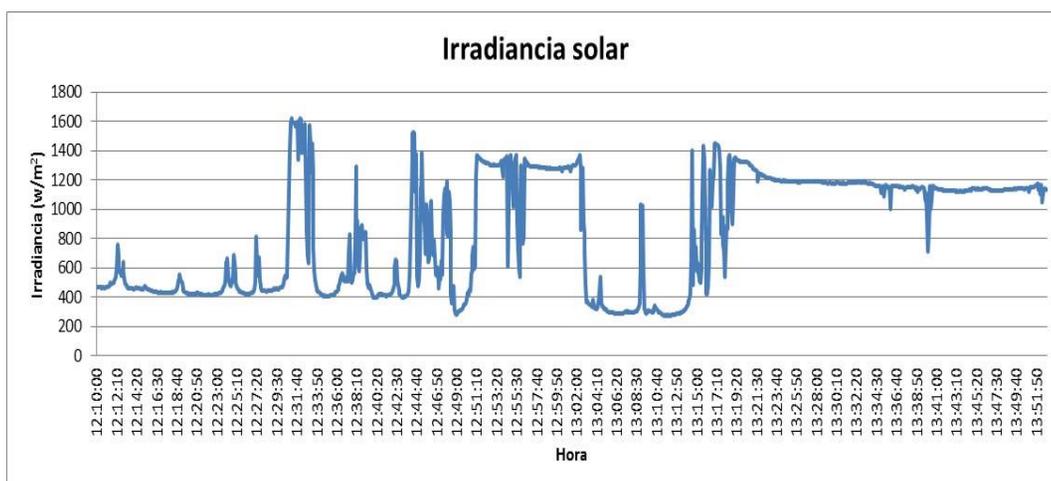


Figura 42. Medición irradiación solar en horas de la tarde

Adicionalmente a la entrada del equipo como se muestra en el plano eléctrico (Anexo B), se encuentra instalado un medidor de energía eléctrica a la entrada del controlador el cual mide: voltaje, corriente, potencia y energía, que en este caso entrega el panel solar al sistema.

Integrando las curvas anteriores en el tiempo del ensayo se determina la irradiación solar en las dos horas de la mañana igual a $605,53 \text{ Wh/m}^2$ y en las dos horas de la tarde $1442,86 \text{ Wh/m}^2$. Los datos medidos se registran en las tablas 15 y 16.

Tabla 15

Pruebas de bombeo en horas de la mañana

Magnitud	Valor	Unidad
Irradiación solar	605,53	Wh/m^2
Área del panel solar	0,560	m^2
Energía solar entrada panel	402,08	Wh
Energía entregada por el panel	42	Wh
Volumen bombeado	0,399	m^3
Rendimiento panel	10,45	%
Energía hidráulica en Julios	9785,48	J
Energía hidráulica en Wh	2,72	Wh
Rendimiento motor - bomba	6,47	%

Tabla 16*Pruebas de bombeo en horas de la tarde*

Magnitud	Valor	Unidad
Irradiación solar	1442,86	Wh/m ²
Área del panel solar	0,560	m ²
Energía solar entrada panel	808,00	Wh
Energía entregada por el panel	46	Wh
Volumen bombeado	0,422	m ³
Rendimiento panel	5,69	%
Energía hidráulica en Julios	10349,55	J
Energía hidráulica en Wh	2,87	Wh
Rendimiento motor - bomba	6,25	%

De acuerdo a los datos de irradiación solar de las tablas anteriores se observa que existe un mayor valor en horas de la tarde, sin embargo, la energía eléctrica requerida para bombear el mismo volumen de agua es aproximadamente el mismo valor.

5.10.2. Determinación del rendimiento del sistema

Con los datos obtenidos se procedió a calcular el rendimiento del sistema de bombeo solar (rendimiento motor - bomba), dando así lo siguiente.

Tabla 17*Determinación rendimiento sistema de bombeo con $G = 1000 \text{ W/m}^2$*

Presión	h	Voltaje	Corriente	Potencia eléctrica	Caudal	Potencia hidráulica	Rendimiento	
(PSI)	(m)	(V)	(A)	(W)	(LPM) (m ³ /s)	(W)	(%)	
4	2,8	19,5	1,43	27,89	4,5	0,00007500	2,07	7,42
10	7,0	19,5	1,59	31,01	4,3	0,00007167	4,92	15,87
20	14,1	19,5	1,91	37,25	4,2	0,00007000	9,68	26,00
25	17,6	19,5	2,05	39,98	4,1	0,00006833	11,78	29,47
30	21,1	19,5	2,35	45,83	4,1	0,00006833	14,14	30,87

De igual manera se realizó la prueba para una irradiancia $G = 350 \text{ W/m}^2$ y los resultados obtenidos se indican en la tabla 18.

Tabla 18

Determinación rendimiento sistema de bombeo con $G = 350 \text{ W/m}^2$

Presión (PSI)	h (m)	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia eléctrica (W)	Caudal (LPM)	(m ³ /s)	Potencia hidráulica (W)	Rendimiento (%)
3,5	2,5	15,5	1,35	20,93	3	0,0000 5000	1,21	5,77
10	7,0	15,5	1,46	22,63	2,5	0,0000 4167	2,86	12,64
15	14,1	15,5	1,59	24,65	2,3	0,0000 3833	5,30	21,51

Entonces tenemos que el rendimiento es el siguiente con datos obtenido de la tabla 17

a 30 PSI:

$$\eta = \frac{P_h}{P_e}$$

$$E_h = \delta ghV$$

$$\frac{E}{t} = P$$

$$\frac{E}{t} = \frac{\delta ghV}{t}$$

$$\frac{V}{t} = Q$$

$$P_h = \delta ghQ$$

$$P_h = (1000 \text{ Kg/m}^3)(9,81 \text{ m/s}^2)(21,1\text{m})(0,00006833 \text{ m}^3/\text{s})$$

$$P_h = 14,14 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{14,14 \text{ W}}{45,83 \text{ W}} = -0,308 * 100\% = 30,8\%$$

Según los datos obtenidos para irradiancia $G = 1000 \text{ W/m}^2$ y mostrados en la tabla 17 se determina para una altura total (h) de 21,1 m un rendimiento del 30,8%, comparados con el valor proporcionado en las especificaciones técnicas del fabricante indica un rendimiento 41% mostrados en los Anexos E.

Comparando los resultados de la tabla 17 y 18 vemos que la eficiencia disminuye al reducir la irradiancia solar.

En el Anexo F se indica la guía de práctica que hará uso el estudiante para la práctica de bombeo fotovoltaico.

CONCLUSIONES

- Una característica principal para el funcionamiento de un sistema de bombeo solar fotovoltaico es la radiación solar captada por paneles fotovoltaicos. En la actualidad hay dos formas más comunes en la fabricación de paneles solares fotovoltaicos, con celdas monocristalinas y policristalinas, los paneles solares monocristalinos son más eficientes por ende mayor costo, los policristalinos son de mayor simplicidad en el proceso de fabricación, lo que deriva en que son paneles más baratos.
- La capacidad de generar electricidad en un panel solar es directamente proporcional al área de captación y la irradiancia. Para el presente proyecto de investigación se llegó a la conclusión de utilizar un solo panel solar policristalino de 85 watts que tiene un área de captación solar de $0,560 \text{ m}^2$.

- La bomba seleccionada para el módulo es una bomba sumergible de desplazamiento positivo con conexión directa sin almacenamiento por batería; la misma que puede operar con un voltaje DC de 12-30 voltios.
- Todo el sistema dependerá de la cantidad de energía hidráulica que se necesita, que a su vez depende del volumen de agua y a la altura que requiere ser elevada.
- El volumen de agua bombeada por el sistema de bombeo solar, es directamente proporcional a la potencia que este dispone, y es inversamente proporcional a la altura a la que se necesita elevar el agua.
- La cantidad de agua impulsada dependerá también de la eficiencia que disponga el sistema de bombeo solar fotovoltaico en conjunto, En condiciones de temperatura normal estas eficiencias son mayores que en condiciones normales de operación.
- La energía eléctrica que requiere el sistema para bombear 400 litros de agua a una altura geométrica de 2,2 metros fue de 42 Wh con una irradiación de 605,53 Wh/m^2 en un período de tiempo de dos horas.
- Para una irradiancia solar de 1000 W/m^2 , una presión de trabajo de 30 PSI (21,1 metros de altura) y con un caudal 4,1 litros por minuto, la eficiencia del sistema moto - bomba fue del 30,8%.

RECOMENDACIONES

- Al momento de instalar la bomba solar; ubicarla en posición vertical dejando un espacio recomendado por el fabricante, con el fin de que los sedimentos en el fondo no interfieran con su funcionamiento.
- Para las conexiones eléctricas de la bomba sumergible y demás subsistemas, realizarlas con empalmes adecuados protegiéndolos con cinta que se endurece con el agua o con cinta térmica.
- Para realizar las operaciones de mantenimiento se recomienda asegurarse de desenergizar el sistema completamente empleando el interruptor de mando del controlador y desconectando la alimentación hacia el medidor de energía instalado.
- Revisar antes de realizar una práctica que las válvulas de paso de fluido estén abiertas, para impedir que la bomba se sobrecargue y pueda trabajar con normalidad.
- Con la infraestructura implementada actualmente se puede realizar a futuro estudios con otros sistemas de bombeo como por ejemplo con moto - bombas que utilicen convertidores de frecuencia con o sin almacenamiento eléctrico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

IPCC. (2011). Recuperado el día/mes/año. Obtenido de https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srren/srren_report_es.pdf

Erenovable. (22 de Junio de 2015). Obtenido de <http://erenovable.com/historia-energia-renovable/>

Abella, M. A., & Romero, F. (10 de 09 de 2017). *Api*. Recuperado el 10 de 03 de 2017, de

http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi:45334/componente45332.pdf

Aqueveque Medina, E. J. (10 de 06 de 2009). *Repositorio U-Chile*. Obtenido de

http://repositorio.uchile.cl/tesis/uchile/2009/cf-aqueveque_em/sources/cf-aqueveque_em.pdf

Arija González, D. (28 de 07 de 2010). *E-archivo.uc3m.es*. Obtenido de [https://e-](https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/10871/PROYECTO%20fina.%20David%20Arija%20Gonzalez.pdf?sequence=1)

[archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/10871/PROYECTO%20fina.%20David%20Arija%20Gonzalez.pdf?sequence=1](https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/10871/PROYECTO%20fina.%20David%20Arija%20Gonzalez.pdf?sequence=1)

Asamblea Nacional del Ecuador. (2010). *LEY ORGÁNICA DE EDUCACIÓN SUPERIOR*. Quito.

BlogMaster. (25 de 04 de 2018). *Mundo Respuestas*. Obtenido de

<http://www.mundorespuestas.com/2013/04/en-que-unidades-se-mide-la-radiacion.html>

Cárdenas, O. (15 de 10 de 2017). *Web del Profesor*. Recuperado el 06 de 04 de 2017, de

<http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/oscaror/CursosDictados/web%20instrume>

ntacion%20industrial/1%20transductores%20para%20procesos%20industriales/li
bro%20pdf/CAP%204%20Medicion_flujo_2009.pdf

CEAACES. (2015). *MODELO GENÉRICO DE EVALUACIÓN DEL ENTORNO DE APRENDIZAJE DE CARRERAS PRESENCIALES Y SEMIPRESENCIALES DE LAS UNIVERSIDADES Y ESCUELAS POLITÉCNICAS DEL ECUADOR*. Quito.

Cengel, Y., & Cimbala, J. (2006). *Mecánica de fluidos*. México, D.F.: McGraw-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V. .

Constitución de la República del Ecuador. (2008).

Contreras, E., & Sánchez, R. (25 de 05 de 2010). *Universidad Industrial de Santander*.

Recuperado el 30 de Julio del 2018. Obtenido de

<http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2010/133923.pdf>

Creus, A. (2006). *Instrumentación Industrial*. México D.F.: Alfaomega.

Creus, A. (2014). *Energías Renovables*. Bogotá: Ediciones de la U.

CubaEduca. (2010). *CubaEduca*. Recuperado el 07 de 04 de 2017, de

<http://educaciones.cubaeduca.cu/medias/pdf/2452.pdf>

De los Santos López, J. P.. *Blogger*. Recuperado el 26 de Junio del 2018. Obtenido de

<http://mk4hidraulica829332.blogspot.com/2015/09/bombas-hidraulicas-de-desplazamiento.html>

EcuRed. (2010). *EcuRed*. Recuperado el 04 de 04 de 2017, de

https://www.ecured.cu/Bombas_Hidráulicas

ESPE- L. (25 de 04 de 2018).

Fernández, P. (2000). *pfernandezdiez*. Recuperado el 21 de 03 de 2017, de

<http://files.redsauce.net/js/pdfjs/web/viewer.html?file=http%3A%2F%2Fmanager.r>

edsauce.net%2FAppController%2Fcommands_RSM%2Fapi%2Fapi_getFile.php
%3FitemID%3D111%26propertyID%3D20%26RStoken%3D59e8ac1045d03e2ff6
564c0638315f38

Frenkel, P., & Thake, J. (2010). *Dispositivos de elevación del agua. Manual para usuarios y planificadores*. México, D.F.: Alfaomega Grupo Editor.

Grupo NAP. (2002). *Coit*. Obtenido de

<https://www.coit.es/file/4245/download?token=F3kPOsFh>

Infragro. *INFRAGRO*. Recuperado el 17 de Julio del 2018. Obtenido de

<http://infragro.co/bombas-de-agua/64-sistema-de-bombeo-solar-sumergible-shurflo-9300-con-baterias.html>

Ingemecánica. *Ingemecánica*. Recuperado el 17 de Julio del 2018. Obtenido de

<https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn193.html>

Instituto Tecnológico de Canarias, S.A. (2008). *Energías renovables y eficiencia energética*. Canarias.

Jimenez, M., & Taipe, F. (2005). *Sistema de adquisición de datos para determinar las características de operación con carga de los motores trifásicos de inducción para el laboratorio de máquinas eléctricas*. Latacunga.

López, J.. *Ingeniería Rural*. Recuperado el 31 de Enero del 2018. Obtenido de

<http://www.ingenieriarural.com/Hidraulica/Temas/Tema1.PDF>

Mataix, C. (2004). *Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas*. México, D.F.: Alfaomega.

MEER. (2013).

- Mena Pachano, A. (2018). *CIE energía.org.ec*. Recuperado el 18 de Abril del 2018
Obtenido de <http://energia.org.ec/cie/el-desarrollo-de-la-energia-renovable-en-el-ecuador/>
- Merino, L. (2012). *Fenercom*. Recuperado el 14 de 03 de 2017, de
<https://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/cuadernos-energias-renovables-para-todos.pdf>
- Ministerio de Electricidad y Energía Renovable del Ecuador. *Ministerio de Electricidad y Energía Renovable*. Recuperado el 18 de Abril del 2018. Obtenido de
<http://www.energia.gob.ec/electrificacion-rural-con-energias-renovables/#>
- NASA Power. *Power Atmospheric Science Data Center*. Recuperado el 28 de Agosto del 2018. Obtenido de <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- PCE. (17 de 07 de 2018). *PCE*.
- Pérez, J. *Blogspot*. Recuperado el 17 de Julio del 2018. Obtenido de
<http://mkjoseperez829371.blogspot.com/2015/09/normal-0-21-false-false-false-es-mx-x.html>
- Pérez, S., & Renedo, C. (2012). *Unican*. Recuperado el 04 de 04 de 2017, de
<http://ocw.unican.es/enseanzas-tecnicas/mecanica-de-fluidos-y-maquinas-hidraulicas/materiales/T08.pdf>
- Perpiñán Lamigueiro, Ó., Colmenar Santos, A., & Castro Gil, M. Recuperado el 26 de Junio del 2018. *Soltuyo*. Obtenido de https://www.soltuyo.com/libros/esf_img-051tco-4.pdf
- Pinteres. Recuperado el 17 de Julio del 2018. *Pinterest*. Obtenido de
<https://www.pinterest.es/pin/864057878482336595>

- Plastigama. Recuperado el 28 de Agosto del 2018. *Plastigama*. Obtenido de <http://www.plastigama.com/wp-content/uploads/2018/07/Tuberi%CC%81as-y-accesorios-de-PVC-y-PE-BD-uso-agri%CC%81cola.pdf>
- Rendón, J. (2006). Recuperado el 01 de Septiembre del 2018. *Oilproduction*. Recuperado el 06 de Abril de 2017, de <http://www.oilproduction.net/files/Reguladoresdepresion.pdf>
- RiegoSolar . Recuperado el 25 de Abril del 2018. *Interempresas*.
- Roldán, J. (2012). *Energías Renovables*. España: Ediciones Paraninfo, S:A.
- Solenergy. Recuperado el 17 de Julio del 2018. *Solenergy*. Obtenido de <https://www.solenergy.cl/kit-riego-solar/66-kit-full-bomba-pozo-profundo-35-mts-energia-solar-500w.html>
- Sun Pumps. Recuperado el 30 de Agosto del 2018. *Sun Pumps*. Obtenido de <https://www.sunpumps.com/Products/SDS-T-128>
- Synthesis Power. Recuperado el 29 de Agosto del 2018. *AWS*. Obtenido de https://s3.amazonaws.com/ecodirect_docs/Synthesis-Power/SP80P-85P-36.pdf
- Tecnología y material sustentables. Recuperado el 17 de Julio del 2018. *TMS*. Obtenido de <https://www.tmsmx.com/productos/bombas-solares-para-agua/sum>
- Ucha. Recuperado el 05 de Mayo del 2019. *Definición ABC*. Obtenido de <https://www.definicionabc.com/ciencia/ingenieria-electrica.php>
- Universidad de Castilla La Mancha *UCLM*. Recuperado el 15 de Diciembre del 2018. Obtenido de https://previa.uclm.es/area/ing_rural/Hidraulica/Temas/TablaRugosidadAbsolutaMateriales.pdf

Utreras, S., & Berrú. *Repositorio ESPE*. Recuperado el 20 de Diciembre del 2018.

Obtenido de <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/337/1/T-ESPE-027403.pdf>

Varitech Ingeniería. Recuperado el 17 de Julio del 2018. Obtenido de

<http://varitech.es/bombeo-solar-fotovoltaico/>

Viejo, M., & Álvarez, J. (2012). *Bombas*. México, D.F.: Editorial Limusa S.A.

VYCMEX. (2010). *Manual de Hidráulica Industrial*. México, D.F.: Vyckers.

Webosolar. Recuperado el 04 de Diciembre del 2018. Obtenido de

<https://webosolar.com/store/es/panel-solar-12-24-volts/1717-modulo-solar-monocristalino-solarland-160-watt-12-volt.html>

Zytech Solar. Recuperado el 18 de Julio del 2018. Obtenido de [http://zytech.es/que-es-](http://zytech.es/que-es-una-celula-solar-y-el-efecto-fotoelectrico/)

[una-celula-solar-y-el-efecto-fotoelectrico/](http://zytech.es/que-es-una-celula-solar-y-el-efecto-fotoelectrico/)

ANEXOS



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA CARRERA

DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

CERTIFICACIÓN

Se certifica que el siguiente proyecto de investigación titulado ***“DIMENSIONADO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DIDÁCTICO DE BOMBEO SOLAR FOTOVOLTAICO PARA EL ANÁLISIS CUANTITATIVO DEL VOLUMEN DE FLUIDO EN LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE EXTENSIÓN LATACUNGA”*** fue desarrollado por el señor: ***VALENCIA VITERI GUILLERMO SEBASTIÁN***, el mismo que cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

En la ciudad de Latacunga, a los 5 días del mes de febrero del 2019

Aprobado por:

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Mario Polibio Jiménez León".

Ing. Mario Polibio Jiménez León
Director del Proyecto

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Katya Torres".

Ing. Katya Torres
Directora de Carrera

Dr. Rodrigo Vaca
Secretario Académico

